

Projeto de uma viatura fórmula elétrica

Rogério José Meirinho Gonzalez

Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Manuel Ferreira Duarte

Co-Orientador: Prof. Armando Luís Sousa Araújo



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2014

(Página em branco)

À minha família, aos meus amigos e ao desporto automóvel...

(Página em branco)

I. Resumo

Tendo como ambição a criação um carro elétrico recorrendo à estrutura de um monolugar, surge o projeto apresentado nesta dissertação, na qual se propõe dimensionar, montar e testar todos os componentes necessários para a construção de um veículo elétrico.

A escolha de um fórmula para servir de base à conversão de um carro a combustão para elétrico, surge pela necessidade da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, estar sempre na vanguarda da tecnologia, acompanhando as grandes competições automóveis a nível mundial, tal como a primeira competição de Fórmulas elétricas do Mundo, com base nos atuais carros de Fórmula 1, criada neste ano de 2014. Depois da experiência bem sucedida da montagem de um veículo elétrico de competição, como foi o caso do Fiat UNO elétrico, a faculdade quer algo mais, quer um carro mais veloz, mais potente e que entusiasme os verdadeiros amantes do desporto automóvel, acompanhando assim a evolução das competições a nível mundial. Foi com esta motivação de fazer algo diferente que foi desenvolvida esta dissertação.

Esta dissertação inicia-se com o estudo teórico das várias tecnologias elétricas que existem, é feita uma abordagem dos diferentes tipos de motores, conversores e inversores, controladores e sistemas de armazenamento de energia. Com base neste estudo foi feita a escolha do motor, controlador e das baterias que irão ser utilizadas na montagem do fórmula.

Paralelamente ao estudo das tecnologias elétricas, foi feita uma análise ao motor existente no fórmula *Glória* B4, por forma a se saber as suas principais características, a nível de aceleração e binário. Com estes dados pode selecionar-se o motor elétrico que melhor se adequa, isto é, que tenha prestações idênticas ao motor a combustão.

Na vertente mais prática deste projeto foram realizadas simulações computadorizadas, para testar o comportamento dos dois motores em pista, e conseguir ter uma comparação mais exata das duas tecnologias. Para o motor a combustão ainda foi realizado um teste em pista, por forma a validar os cálculos teóricos relativos à aceleração do carro. Nesta secção da dissertação foram ainda modelados e dimensionados todos os componentes necessários à montagem do motor elétrico, recorrendo-se a programas de desenho 3D e 2D e ainda a *software* de simulação, por forma a fazer os cálculos por elementos finitos das peças.

Com base nos estudos realizados foram retiradas algumas considerações finais desta dissertação. Entre as várias conclusões tiradas, relativamente à escolha do motor, das baterias e da modelação das peças, foi feita uma reflexão sobre a complexidade do projeto. Devido ao grande número de variáveis presentes num projeto desta dimensão, não foi possível concluir todos os objetivos propostos. A parte do fabrico das peças não ficou concluída, e desse modo não foi possível fazer a montagem de todos os componentes, o que acarretou também a impossibilidade de testar o monolugar convertido em elétrico.

(Página em branco)

II. Abstract

Based on the ambition to create an electric car using the structure of a single seater, arises the project presented in this thesis. In which proposes to dimension, assemble and test all necessary components for the construction of electric vehicle.

The choice of a formula as basis for converting a car to electric combustion arises by ambition of the “Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto” of always be at the forefront of technology, following the major global car competitions, such as the first competition Formulas electrical World, based on the current Formula 1 cars, created this year 2014. After the successful experience in the assembly of an electric vehicle competition, as was the case of the electric Fiat UNO, the college wants something more, wants a more powerful and fastest car that excites the true motoring enthusiasts, thus following the evolution of competitions worldwide. So with this motivation to do something different this dissertation was written.

The dissertation begins with the theoretical study of various electrical technologies that exist, an approach of different types of motors, converters and inverters, controllers and energy storage systems is done. Based on this study was made to choose the motor, controller and batteries that will be used in the assembly of the formula.

Parallel to the study of electrical technologies, an analysis of the existing engine in Formula glory B4, so knowing their main characteristics, the acceleration and torque was taken. With this information you can select the electric motor that best fits, i.e., it has similar benefits to the combustion engine.

In a more practical part of this project, computer simulations were performed to test the behaviour of the two engines on the track and get a more accurate comparison of both technologies. For the combustion engine it was tested on the track, in order to validate the theoretical calculations for the acceleration of the car. In this section of the dissertation we’ve also modelled and scaled all the necessary components for the assembly of the electric motor, resorting to 2D and 3D design software and also the simulation software in order to do the calculations by finite element method.

Ultimately we’ve established some last considerations of this dissertation. Among the various conclusions, concerning the choice of motor, batteries and parts modelling, we conduct an analysis on the complexity of the project. Due to the large number of variables involved in a project of this size, it wasn’t possible to complete all objectives. The part of the manufacture of the parts was not completed, and thus it was not possible to assemble all components, which also resulted in the impossibility to test the single seater converted to electric.

(Página em branco)

III. Agradecimentos

Ao meu orientador, o Professor Doutor José Manuel Ferreira Duarte, pela amizade, pelo empenho, pela confiança depositada, pelos níveis de exigência e por toda a orientação durante a realização desta dissertação e ao longo de todo o curso.

Ao meu co-orientador, o Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos relativos a área de eletrotecnia.

Ao Professor Doutor Adriano Carvalho pelo empenho demonstrado na realização deste projeto.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) por disponibilizar as instalações, equipamentos e material para a realização desta dissertação.

Aos Engenheiros Bruno Azevedo, Daniel Magalhães, Agostinho Rocha e Ricardo Soares pelo grande apoio, empenho e amizade que tiveram durante toda a realização deste projeto.

À equipa Comval Racing, em especial aos Engenheiros Nuno Magalhães e Tiago Allen Ramos pelo apoio prestado na realização dos testes em pista.

Ao Sr.º José Fernando Almeida, ao Sr.º Albino Dias e ao Sr.º José Teixeira pela ajuda na conceção e fabrico das peças necessárias à construção do veículo.

Aos meus colegas e amigos que me deram todo o apoio moral, me incentivaram a trabalhar e a fazer cada vez melhor, pelos conselhos que me deram, pelas palavras de confiança e pelas chamadas de atenção, mas sobretudo pela amizade demonstrada.

À minha família, que foi o pilar de todo este projeto, pelo apoio demonstrado, pela confiança depositada, pelos conselhos, pelas frases amigas, pelos sorrisos e abraços, e por todos aqueles dias em que me levantaram a mural e me fizeram continuar.

O meu muito obrigado a todos aqueles que de algum modo contribuíram para esta dissertação.

Muito Obrigado!

(Página em branco)

Índice

Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Apresentação e objetivos do Projeto – Fórmula Elétrico	2
1.2. Estrutura da dissertação	2
Capítulo 2 – Estado de arte	5
2.1. História dos veículos automóveis elétricos.....	5
2.2. Motores elétricos na Fórmula 1	6
2.3. Tipo de veículos automóveis elétricos.....	7
2.3.1. Veículo elétrico a baterias – BEV (battery electric vehicle).....	9
2.4. Sistema de propulsão	13
2.4.1. Motor DC	14
2.4.2. Motor de Indução (IM)	14
2.4.3. Motor síncrono de ímãs permanentes sem escovas.....	15
2.4.4. Motor de relutância comutada.....	17
2.4.5. Comparação entre os 4 motores	17
2.5. Conversores de Potência.....	18
2.6. Inversores.....	19
2.7. Controlador	20
2.8. Sistemas de armazenamento de Energia	21
2.8.1. Baterias.....	22
2.8.2. Supercondensadores.....	25
Capítulo 3 – Modelo Físico do Fórmula Glória B4	27
3.1. Cálculo do binário e potência à roda	28
3.2. Cálculo do binário de arranque.....	31
Capítulo 4 – Motor elétrico.....	35
4.1. Caixa de velocidades	39
Capítulo 5 – Software Optimum Lap.....	43
5.1. Simulação em Optimum Lap – Motor térmico	43
5.1.1. Simulação em Pista – Motor térmico.....	46
5.2. Simulação em Optimum Lap – Motor elétrico	49
5.2.1. Simulação em Pista – Motor Elétrico	51
5.2.2. Simulação em Pista – Motor Elétrico limitado a 70 kW.....	53
Capítulo 6 – Baterias.....	57
6.1. Baterias de Lítio - Polímero.....	57

6.2. Dimensionamento das baterias	59
Capítulo 7 – Modelação do sistema powertrain.....	63
7.1. Modelação das peças para o motor e controlador.....	63
7.1.1. Suporte do Resolver	64
7.1.2. Veio de transmissão de potência.....	65
7.1.3. Veio de transmissão de rotação para o resolver.....	67
7.1.4. Apoio fixo do motor.....	68
7.1.5. Apoio de suporte no veio de transmissão de potência do motor.....	70
7.1.6. Peças de refrigeração do controlador eletrónico	72
7.2. Modelação Caixas de baterias.....	73
7.3. Modelação dos apoios dos packs de baterias.....	79
7.3.1. Suporte 1	80
7.3.2. Suporte 2	82
7.3.3. Suporte 3	85
Capítulo 8 – Testes em pista	87
8.1. Teste fórmula com o motor a combustão.....	87
8.2. Validação do sistema powetrain	89
Capítulo 9 – Considerações Finais.....	93
9.1. Conclusões	93
9.2. Trabalhos Futuros	94
Capítulo 10 - Referências.....	95
Capítulo 11 - Anexos	97
11.1. Anexo 1 – Folha de cálculo motor a combustão	97
11.2. Anexo 2 – Folha de cálculo binário de arranque.....	101
11.3. Anexo 3 – Tabela motores elétricos.....	103
11.4. Anexo 4 – Folha de cálculo motor elétrico	105
11.5. Anexo 5 – Relatório Optimum Lap – Motor térmico	107
11.6. Anexo 6 – Tabela de resultados Optimum Lap – Motor térmico.....	109
11.7. Anexo 7 - Relatório Optimum Lap – Motor elétrico	113
11.8. Anexo 8 - – Tabela de resultados Optimum Lap – Motor elétrico	115
11.9. Anexo 9 – Desenhos definição.....	119
11.10. Anexo 10 – Relatório elementos finitos veio de saída de potência	121
11.11. Anexo 11 – Relatório elementos finitos apoio fixo	123
11.12. Anexo 12 – Relatório elementos finitos apoio veio de transmissão	125

11.13.	Anexo 13 – Relatório elementos finitos suporte 1 - baterias	127
11.14.	Anexo 14 – Relatório elementos finitos suporte 2 - baterias	129
11.15.	Anexo 15 – Relatório elementos finitos suporte 3 - baterias	131

IV. Lista de figuras

Figura 1 - Motor Renault da Fórmula 1[15]	7
Figura 2 - Esquema básico de um veículo com motor elétrico[16]	10
Figura 3 - Esquema detalhado de todos os componentes de um veículo elétrico	10
Figura 4 - Diversas tipologias de veículos automóveis elétricos[16]	12
Figura 5 - Representação esquemática de quatro motores elétricos[18]	13
Figura 6 - Curvas de binário-potência de um motor DC [18]	14
Figura 7 - Curvas de binário-potência de um motor de indução [18]	15
Figura 8 - Curvas de binário-potência de um motor de síncrono de ímanes permanentes [18]	16
Figura 9 - Representação esquemática da montagem de motor síncrono de ímanes permanentes na roda de um veículo[18]	16
Figura 10 - Curvas de binário-potência de um motor de relutância comutada [18]	17
Figura 11- Características binário-velocidade do conversor de potência em ponte completa .	19
Figura 12 - 4 tipologias básicas de inversores[21]	20
Figura 13 - Fórmula Glória B4	27
Figura 14 - Fotografia da correia de transmissão, do pinhão e da cremalheira, e os respectivos diâmetros	28
Figura 15 - Diagrama de forças aplicadas ao fórmula	32
Figura 16 - Definição do tipo de veículo e do peso - Optimum Lap	43
Figura 17 - Definição do coeficiente de arrasto, área frontal e densidade do ar - Optimum Lap	43
Figura 18 - Definição das características dos pneus - Optimum Lap	44
Figura 19 - Definição do binário, das relações de caixa e dos rendimentos - Optimum Lap	45
Figura 20 - Desenho da pista do Autódromo do Estoril [34]	47
Figura 21 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula atinge no circuito do Estoril.	47
Figura 22 - Mudança usada em cada zona da pista	48
Figura 23 - Definição do binário e das relações de caixa - Optimum Lap	50
Figura 24 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 40 kW atinge no circuito do Estoril	51
Figura 25 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW atinge no circuito do Estoril	54
Figura 26 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW – relação de caixa: 2	55
Figura 27 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW – relação de caixa: 1,8	55

Figura 28 - Vista de corte de uma célula de bateria [30].....	57
Figura 29 - Célula de bateria igual a utilizada neste projeto [30].....	58
Figura 30 - Esquema de montagem das baterias num pack.....	61
Figura 31 - Dimensões do motor Emrax 228 [1].....	63
Figura 32 - Desenho 3D do motor elétrico	63
Figura 33 - Peça de suporte do resolver	64
Figura 34 - Zona de fixação do veio de transmissão	65
Figura 35 - Zona e direção da aplicação da força no veio de transmissão	66
Figura 36 - Simulação da deformação máxima da peça.....	66
Figura 37 - Veio de transmissão de potência do motor	67
Figura 38 - Veio de transmissão de rotação para o resolver.....	67
Figura 39 – Apoio fixo - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força.....	68
Figura 40 - Simulação da deformação máxima da peça.....	69
Figura 41 - Apoio fixo do motor	69
Figura 42 – Apoio de suporte - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força	70
Figura 43 - Simulação da deformação máxima da peça.....	71
Figura 44 - Apoio de suporte no veio de transmissão de potência do motor	71
Figura 45 - Conjunto do motor mais apoios, resolver e veios de transmissão de potência e rotação	72
Figura 46 - Representação da placa de refrigeração em tanque do controlador.....	72
Figura 47 - Representação da placa de refrigeração em serpentina do controlador	73
Figura 48 - Dimensões de uma célula de bateria.....	73
Figura 49 - Parte lateral das caixas de baterias.....	74
Figura 50 - Peça de topo das caixas de baterias	74
Figura 51 - Peça do fundo da caixa	75
Figura 52 - Parte de cima da caixa de baterias com algumas das ligações elétricas	76
Figura 53 - Cobertura do pack de baterias.....	76
Figura 54 - Representação do chassis do fórmula Glória com as respetivas baterias e motor elétrico	77
Figura 55 - Peça de topo com metade da largura	77
Figura 56 - Peça do fundo com metade da largura.....	77
Figura 57 - Conjunto de peças em alumínio para montagem de um pack de baterias	78
Figura 58 - Caixa de baterias em alumínio montada.....	78
Figura 59 - Caixa de baterias completa	79

Figura 60 - Representação do chassis do fórmula Glória com as respetivos suportes das baterias	80
Figura 61 - Abraçadeira em "U"	80
Figura 62 - Desenho 2D do suporte 1	81
Figura 63 - Representação 3D do suporte 1	81
Figura 64 – Suporte 1 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força.....	82
Figura 65 - Representação 2D da parte central do suporte 2.....	83
Figura 66 - Representação 2D do triângulo de aumento de rigidez	83
Figura 67 - Representação 2D da chapa de fixação entre o suporte 1 e 2	83
Figura 68 - Representação 3D do suporte 2	84
Figura 69 - Suporte 2 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força.....	84
Figura 70 - Representação 2D da parte central do suporte 3	85
Figura 71 - Representação 2D do triângulo de aumento de rigidez	85
Figura 72 - Representação 3D do suporte 3	86
Figura 73 - Suporte 3 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força.....	86
Figura 74 - Vista de baixo da montagem do motor elétrico no FIAT UNO.....	90
Figura 75 - Vista de cima da montagem do motor elétrico no FIAT UNO.....	90

V. Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação entre os BEV e os HEV. Adaptado de [16].....	9
Tabela 2 - Comparação entre 4 motores elétricos[18].....	18
Tabela 3 - Característica do conversor de potência em ponte completa	19
Tabela 4 - Comparação entre vários tipos de baterias comercializadas. Adaptado de[26-28].	23
Tabela 5 - Relações de caixa do Fórmula Glória B4 [31]	28
Tabela 6 - Relação de transmissão total do fórmula Glória	29
Tabela 7 - Características gerais da roda do fórmula	30
Tabela 8 - Dados gerais fórmula Glória B4.....	33
Tabela 9 - Resultados das equações 8 até 14.....	34
Tabela 10 - Dados gerais do motor EMRAX 228 [33].....	36
Tabela 11 - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para uma relação de caixa....	38
Tabela 12 - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para a primeira relação caixa	40
Tabela 13 - - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para a segunda relação de caixa	41
Tabela 14 - Características de uma célula de bateria [35].....	58
Tabela 15 - Resultados das equações 18 até 22.....	60
Tabela 16 - Dimensionamento de um pack de baterias	62
Tabela 17 - Dimensionamento do conjunto de três packs de baterias.....	62
Tabela 18 - Resultados dos testes realizados no circuito Vasco Sameiro	88

VI. Lista de gráficos

Gráfico 1 - Densidade energética vs. Potência específica para diferentes tipos de tecnologias	22
Gráfico 2 - Densidade energética vs. Potência específica para diferentes tipos de baterias [29]	23
Gráfico 3 - Comparação entre uma bateria com e outra sem balanceamento [30].....	24
Gráfico 4 – Curvas de potência-binário do fórmula Glória B4 [32]	30
Gráfico 5 - Aceleração dos 0-100km/h do fórmula.....	32
Gráfico 6 – Curvas de potência-binário do motor EMRAX 228[33]	37
Gráfico 7 - Curva potência-binário da solução elétrica que foi instalado no fórmula – Potência (azul) e Binário (preto)	38
Gráfico 8 - Curvas de potência e binário desenhadas pelo software Optimum Lap – Potência (azul) e Binário (preto)	46
Gráfico 9 - Zona da pista onde o fórmula desacelera e acelera	48
Gráfico 10 - Escalonamento das mudanças	49
Gráfico 11 - Curva potência-binário da solução elétrica que foi instalado no fórmula – Potência (azul) e Binário (preto)	51
Gráfico 12 - Comparação entre as zonas da pista onde o fórmula a combustão (verde) e elétrico (bordô) desaceleram e aceleram	52
Gráfico 13 - Variação da rotação do motor em função da zona da pista – motor térmico (verde) e motor elétrico (bordô).....	53
Gráfico 14 - Comparação das curvas de aceleração entre as 3 soluções	54
Gráfico 15 - Curva de determinação da relação de caixa ideal	56
Gráfico 16 - Variação das rotações do motor em função do tempo para o 1º teste.....	89
Gráfico 17 - Variação das rotações do motor em função do tempo para o 6º teste.....	89

VII. Símbolos e Abreviaturas

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AC	Corrente Alternada
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Veículo elétrico a baterias)
DC	Corrente Contínua
ERS	<i>Energy Recovery Systems</i> (Sistema de armazenamento de energia)
EV	<i>Electric Vehicle</i> (Veículo elétrico)
FCEV	<i>Fuel Cell electric vehicle</i> (Veículo elétrico de células de combustível)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIA	Federação Internacional do Automóvel
HEV	<i>Hybrid electric vehicle</i> (Veículo elétrico híbrido)
IM	<i>Induction motor</i> (Motor de indução)
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
KERS	<i>Kinetic Energy Recovery System</i> (Sistema de armazenamento da energia cinética)
MGU-H	<i>Motor Generator Unit - Heat</i> (Gerador de aproveitamento da energia térmica)
MGU-K	<i>Motor Generator Unit - Kinetic</i> (Gerador de aproveitamento da energia cinética)
PEV	<i>Plug-in electric vehicle</i> (Veículo elétrico de recarregamento pela rede)
PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicle</i> (Veículo elétrico híbrido de recarregamento pela rede)
WTCC	<i>World Touring Car Championship</i> (Campeonato do Mundo de Carros de Turismo)

Lista de símbolos (ordenadas por ordem alfabética)

i	Relação de transmissão
C_x	Coefficiente de arrasto do ar
h_{pp}	Altura do perfil do pneu
η	Rendimento
C_{rr}	Coefficiente de arrasto do pneu

(Página em branco)

Capítulo 1 – Introdução

As preocupações a nível ambiental, a escassez de petróleo, o aumento do preço dos combustíveis tem vindo a motivar os governos a procurar soluções mais económicas e menos poluentes. Desde a assinatura do protocolo de Quioto os países foram obrigados a reduzir as emissões poluentes, dado que os automóveis a combustão são responsáveis por um terço da emissão de monóxido de carbono e óxidos de azoto para a atmosfera e representam 20% da poluição mundial, pode afirmar-se que os veículos têm uma grande influência no aquecimento global. [2]

Com a motivação de reduzir as emissões poluentes e cumprir as metas estipuladas no protocolo, os países começaram por reduzir as emissões poluentes na indústria, no entanto visto não era suficiente tiveram de encontrar outra forma de combater a poluição. Visto serem os automóveis os responsáveis por 20% da poluição mundial, se os governos conseguirem diminuir as suas emissões, conseguiram assim reduzir a poluição.

No seguimento dos pontos apresentados anteriormente, ressurgiu nos últimos anos, o interesse nos automóveis elétricos, estes estiveram entre os primeiros veículos construídos na indústria automóvel. E agora, nos últimos 20 anos voltaram a ser desenvolvidos e construídos por forma a combaterem os motores de combustão interna.

Em Portugal a mobilidade elétrica tem tido um crescimento elevado, foram criadas redes de reabastecimento rápido para automóveis elétricos, tal com a rede *Mobi.e* que até 2011 instalou cerca de 1300 postos de reabastecimento em 25 capitais de distrito em Portugal.[3, 4] Para incentivar mais a troca dos carros a combustão por elétricos o governo criou incentivos e benefícios fiscais para quem efetuar esta troca.

Por forma a sensibilizar as pessoas para a importância dos veículos automóveis elétricos, e mostrar que estes são fontes fiáveis, o mundo do desporto automóvel começou a utilizar motores elétricos e combustíveis menos poluentes nos principais campeonatos do mundo. Por exemplo o WTCC – Campeonato do Mundo de Carros de Turismo, começou por utilizar cerca de 10% de substâncias não poluentes na gasolina e nos carros a gasóleo substituiu o Diesel por biodiesel.[5] Já na Fórmula 1, desporto rei do automobilismo, foram introduzidos motores elétricos como fonte de auxílio de potência ao motor térmico, tais como o sistema KERS e mais recentemente os sistemas MGU-K e o MGU-H. Claro que para os amantes do desporto automóvel estas alterações não são bem recebidas, pois o barulho e o fumo são das partes mais interessantes e empolgantes neste desporto, e a introdução dos motores elétricos veio tirar esse espetáculo, tornando as corridas mais silenciosas. Não se perdeu potência, nem velocidade, pelo contrário até aumentaram estas características, mas a perda do som dos carros é para os amantes deste desporto uma perda tão relevante, que leva a comentarem que os carros são agora mais fracos e mais lentos.

Com tanta controvérsia na introdução dos motores elétricos no desporto automóvel, “Será que algum dia estes motores poderão ser realmente introduzidos no desporto automóvel?”. A resposta a esta pergunta deverá estar para breve com a criação recente da Fórmula E, uma competição de monolugares, idênticos aos Fórmula 1, totalmente elétricos. A receção por parte do público a esta nova competição ditará a resposta a pergunta apresentada.

Esta dissertação surge no seguimento dos temas até agora apresentados, tendo como principal objetivo a construção de um fórmula totalmente elétrico a partir de um fórmula a combustão.

1.1. Apresentação e objetivos do Projeto – Fórmula Elétrico

O projeto Fórmula Elétrico consiste na conversão de um fórmula existente na faculdade com um motor a combustão num veículo completamente elétrico com características semelhantes, a nível de velocidade máxima e de aceleração.

O desenvolvimento deste projeto envolve diferentes áreas da engenharia, desde a engenharia mecânica, a eletrotécnica e a química. No caso da mecânica, esta está focada nas áreas de automóvel, materiais e processos de fabrico. A parte de engenharia eletrotécnica é a área que neste momento está em maior desenvolvimento, pois tem vindo a evoluir com o desenvolvimento dos motores elétricos e dos sistemas de controlo e armazenamento de energia. A área de química tem vindo a ser o apoio da anterior engenharia, no desenvolvimento das baterias.

Este projeto é inteiramente desenvolvido pelo autor desta tese, com o apoio de quatro engenheiros do departamento de Eletrotecnia na parte de montagem dos packs de baterias, no seu balanceamento e no resto das montagens elétricas necessárias. O sistema de ligações mecânicas, desde apoios do motor e transmissão de potência, a parte de cálculo do motor elétrico e do número de baterias necessárias, das relações de caixa e do dimensionamento das caixas de baterias são descritos nesta dissertação. Como complemento a este estudo ainda são referidos os testes realizados em pista que serviram para comprovar os cálculos teóricos.

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver o projeto de uma viatura fórmula elétrica, este objetivo principal pode ser subdividido em vários objetivos parciais, mas todos eles tem um em comum: a conversão de um carro a combustão para elétrico, mantendo as mesmas características de velocidade e aceleração.

Como objetivos da tese tem-se: o estudo aprofundado dos vários tipos de motores elétricos; o estudo do motor a combustão e da caixa de velocidades existente no fórmula *Glória B4*; e o estudo das baterias, e dos respetivos controlos eletrónicos.

1.2. Estrutura da dissertação

Com o objetivo principal referido no final do subcapítulo anterior como pano de fundo da tese, foram sendo criadas metas, que balizaram o estudo desta dissertação. Para melhor distinção de cada uma das metas criadas, estas foram divididas em nove capítulos.

O primeiro e presente capítulo refere-se a introdução, onde se contextualiza, referencia e explicita o projeto, são definidos os objetivos e explicado de uma forma sumária o que o autor fez na sua dissertação.

O segundo capítulo contém uma análise do estado de arte dos veículos automóveis elétricos, com ênfase nas tecnologias associadas à propulsão, ao controlo e ao armazenamento de energia. Este capítulo pode denominar-se como sendo teórico, pois é nele que está toda a parte teórica por detrás da montagem de um carro elétrico.

O terceiro capítulo apresenta o estudo teórico feito ao motor térmico, das relações de caixa existentes neste, e de toda a sua performance. Este capítulo vai servir para posterior comparação com o motor elétrico. Outro fator relevante desta secção é o cálculo que é feito do binário de arranque.

O capítulo quatro é sobre a escolha do motor elétrico, e da relação de caixa necessária para que o motor tenha a mesmas performances que o térmico. Nesta secção foi feito também o estudo de uma possível caixa de velocidades para a montagem no motor elétrico.

O quinto capítulo apresenta as simulações computadorizadas que mostram as performances do carro a combustão e elétrico numa volta a uma pista.

O capítulo seis refere todos os cálculos feitos para a escolha e dimensionamento das baterias.

O sétimo capítulo apresenta a modelação 3D e 2D das peças que servem para a montagem do motor elétrico e das baterias no chassis do fórmula. Nesta secção também são referidos os cálculos por elementos finitos feitos as peças que vão estar sujeitas a maiores esforços.

No oitavo capítulo é feita a apresentação dos resultados obtidos do teste em pista que o fórmula, ainda a combustão, realizou.

No último capítulo são apresentadas as conclusões deste projeto, algumas perspetivas futuras e as considerações finais feitas pelo autor.

(Página em branco)

Capítulo 2 – Estado de arte

Neste capítulo será feita uma abordagem da história dos veículos automóveis elétricos e da sua importância nos dias de hoje. Vai ser também falado da integração dos motores elétricos na competição automóvel, e principalmente na Fórmula 1.

Será abordado de uma forma sumária as várias tipologias de veículos automóveis elétricos, e a uma breve comparação com os automóveis híbridos. Referenciar-se-ão os vários motores que estão a ser comercializados para este tipo de carros, e também vai ser dada alguma atenção aos vários componentes de um carro elétrico, tais como as baterias, conversores, inversores e controladores.

2.1. História dos veículos automóveis elétricos

A história do automóvel não se pode escrever sem referir os veículos automóveis elétricos, estes estão entre os primeiros carros construídos na indústria automobilística. O primeiro esboço de um motor elétrico foi feito por Michael Faraday, em 1821, ao qual o físico inglês chamou de “rotação eletromagnética”[6]. Entre 1832 e 1839 o escocês Robert Anderson criou o primeiro veículo elétrico, funcionava com de baterias não recarregáveis[7].

Em 1906, surgiu um dos primeiros híbridos paralelos, o *Auto-Mixte* produzido em Liège na Bélgica, segundo a patente de *Henri Pieper*. Este veículo apresentava um motor elétrico e um motor de combustão ligados mecanicamente. O motor elétrico era alimentado por baterias e servia como motor de arranque e como fonte adicional de binário. Quando a potência gerada pelo motor de combustão fosse superior à requerida para mover o veículo, o motor elétrico passaria a funcionar como gerador, carregando as baterias. Outros veículos híbridos foram sendo criados ao longo dos anos, por exemplo em 1917 surgiu o *Woods Dual Power*, mais uma vez era um híbrido paralelo, que funcionava através de uma embraiagem magnética, e tinha a possibilidade de trabalhar somente elétrico, ou a gasolina ou então através da combinação de ambos os tipos de motorização.[8]

Desde o primeiro carro elétrico surgiram muitos outros, levando a que em 1900, 28% dos automóveis nos Estados Unidos rodavam a eletricidade. O crescimento do automóvel elétrico era tão grande que, em 1897, uma frota de táxis elétricos operava em Nova Iorque[9].

Na competição automóvel deve salientar-se o piloto Frank Duryea que em 1895, venceu a primeira corrida de automóveis da América com um carro elétrico, sobrepondo-se a três veículos a gasolina e a outros dois elétricos[10].

O declínio do veículo elétrico deveu-se ao aparecimento de Henry Ford na indústria automobilística, este revolucionou todo o processo de montagem e produção de veículos, criando o que se denominou por produção em massa. Este novo conceito aliado ao surgimento da indústria petrolífera, e também às evidentes vantagens dos veículos a combustão interna, tais como terem melhores performances, atingirem velocidades mais elevadas, mais autonomia e toda a infraestrutura que teria de ser montada para recarregar as baterias fez com que os carros elétricos praticamente desaparecessem. Só em meados dos anos 60 voltou a ressurgir o interesse por carros movidos a eletricidade[11].

Apesar de o veículo elétrico ter sido esquecido após a primeira Guerra Mundial, os comboios nas minas de carvão os metropolitanos nas grandes cidades continuavam a utilizar motores elétricos. Nos anos 40 do séc. XX os comboios a Diesel eram os mais utilizados nas linhas ferroviárias, mas passados vinte anos, com o avanço da tecnologia o comboio elétrico foi ganhando importância, tendo mesmo vindo a substituir grande parte dos comboios existentes. Adaptado de [7].

O reaparecimento no interesse dos carros elétricos surgiu nas décadas de sessenta e setenta, devido as primeiras crises do petróleo e a crescente preocupação ambiental, os avanços nas áreas das baterias e dos novos dispositivos eletrônicos, veio mostrar ao mundo que os carros elétricos podem ser uma alternativa viável aos atuais meios de transportes. Adaptado de [11].

Nos anos 90 a quota de mercado dos veículos automóveis elétricos começou a crescer, nesta altura com a guerra do Golfo o preço do barril de petróleo atingiu valores recorde, as questões ambientais eram cada vez mais relevantes, decorriam por todo o mundo uma série de eventos, onde se debatiam as alterações climáticas e as suas consequências no futuro, todas estas atividades culminaram no Protocolo de Quioto, assinado no ano de 1997. Adaptado de [12].

Com o rápido crescimento da cota comercial dos carros elétricos, e para mais rápida evolução destes veículos a Federação Internacional do Automóvel (FIA) decidiu criar uma categoria para carros com energias alternativas, sendo esta intitulada de *FIA Alternative Energies Cup*. Mais recentemente foi criada a *FIA Fórmula-e Championship*, este vai ser um campeonato de monolugares, uma imitação da Fórmula 1, mas com carros elétricos[13].

Outro campeonato existente é *Fórmula Student Electric*, este também consiste numa competição de monolugares, que são projetados e concebidos por alunos universitários. Esta competição tem como objetivo ensinar e criar espírito competitivo entre alunos das faculdades de engenharia, fazendo com que novas tecnologias sejam desenvolvidas, por forma a melhorar cada vez mais os seus protótipos.

2.2. Motores elétricos na Fórmula 1

Mais recentemente pode ver-se a aplicação da tecnologia dos motores elétricos nos carros de Fórmula 1. Desde 2009 é utilizado o sistema KERS (*Kinetic Energy Recovery System*), esta tecnologia baseia-se no aproveitamento da energia cinética libertada, quando se efetua uma travagem, transformando-a em energia elétrica. Esta energia armazenada num pequeno conjunto de baterias e supercondensadores podia ser utilizada durante 6,67 segundos por volta, fazendo um acréscimo de 60 kW (aproximadamente 80 cv) ao motor.

No ano de 2014, com a mudança de motores nos carros de Fórmula 1, passando do V8 atmosférico para um V6 turbo, foram introduzidos vários componentes eletrônicos, que vieram trazer ainda mais potência e menores consumos. O sistema KERS foi substituído pela tecnologia ERS (*Energy Recovery Systems*), esta alia dois tipos de motores elétricos o MGU-K (*Motor Generator Unit - Kinetic*) e o MGU-H (*Motor Generator Unit - Heat*).

A tecnologia MGU-K é muito idêntica ao antigo KERS, aproveita a energia cinética da travagem, e converte-a para energia elétrica armazenando tudo numa *Energy Store (ES)*, que funciona com um conjunto de baterias e supercondensadores. Esta zona de armazenamento

também recebe energia da MGU-H, que transforma a energia térmica proveniente dos gases de escape a saída do turbo, e a transforma também em energia elétrica.

Este conjunto das duas tecnologias consegue fornecer aproximadamente mais 160 cv, durante cerca de 33 segundos por volta. O sistema ERS consegue fornecer mais potência do que a anteriormente referida, mas por motivos de regulamento técnico, esta tecnologia não pode fornecer tudo o seu potencial. Adaptado de [14].

Na figura 1 pode visualizar-se o sistema ERS e o turbocompressor utilizado nos motores de Fórmula 1, em 2014.

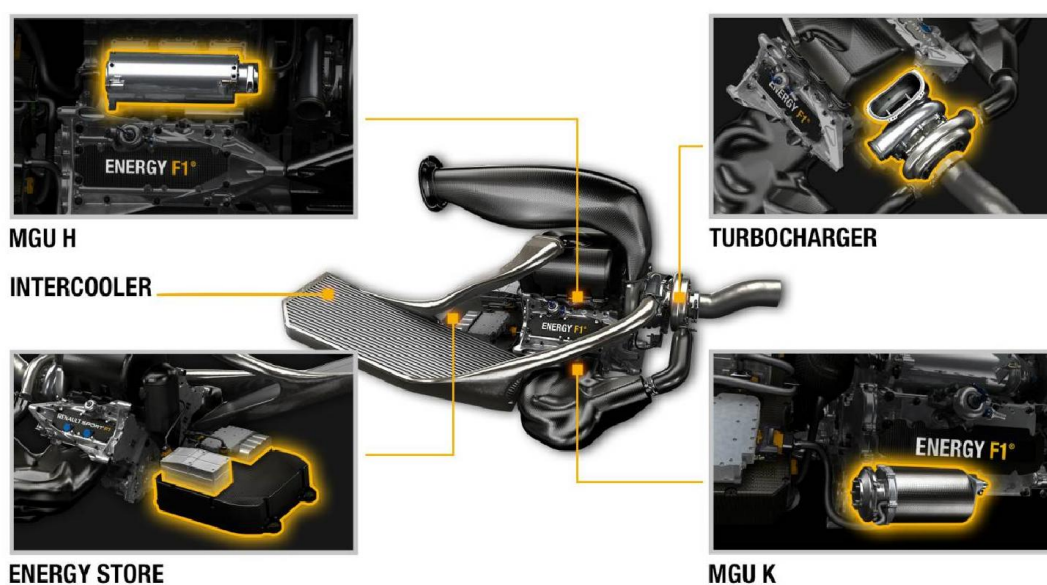


Figura 1 - Motor Renault da Fórmula 1[15]

2.3. Tipo de veículos automóveis elétricos

Foram vários os tipos de veículos desenvolvidos com motorização elétrica, alguns com tração total ou então parcial[16]. Entre os diferentes carros tem de se realçar os seguintes:

- Veículo elétrico a baterias – BEV (*battery electric vehicle*)
- Veículo elétrico de recarregamento pela rede – PEV (*plug-in electric vehicle*)
- Veículo elétrico de células de combustível – FCEV (*fuel cell electric vehicle*)
- Veículo elétrico híbrido – HEV (*hybrid electric vehicle*)
- Veículo elétrico híbrido de recarregamento pela rede – PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*)

Os veículos automóveis elétricos mais comuns dos acima indicados, são os BEV e os HEV. Estes automóveis tem em comum a mesma fonte de energia, têm pelo menos um motor elétrico para a locomoção, podendo ter mais caso se tenha um motor por roda ou então um por

eixo. No caso dos híbridos para além de terem o motor elétrico para locomoção, têm um motor para o recarregamento das baterias.

Os veículos com células de combustível têm cada vez mais sido desenvolvidos, estando ainda em fase de estudo. A pesquisa de novas formas de geração de energia elétrica, surge pois existe uma grande diferença entre a densidade energética da gasolina (cerca de 46,9 MJ/kg) e das baterias de íões de lítio (cerca de 0.54-0.72 MJ/kg). [17] A tão diminuta densidade energética das baterias, face a gasolina, é a grande desvantagens dos veículos automóveis elétricos, deste modo a criação de células de combustível que possam aproveitar a energia de algum tipo de elemento com maior densidade energética, tal como o hidrogénio pode ser um grande passo no desenvolvimento dos veículos automóveis elétricos.

Os veículos *plug-in* são uma derivação dos BEV e dos HEV, tem a mesma base destes, sendo que as baterias são recarregáveis a partir da rede doméstica.

Comparando os veículos híbridos e os a baterias, que são os mais comercializados, podemos constatar que tem diferentes autonomias, meios de propulsão e emissões de gases poluentes.

Na tabela 1 pode visualizar-se uma tabela comparativa entre os dois tipo de veículos, os BEV e os HEV.

Tabela 1 - Comparação entre os BEV e os HEV. Adaptado de [16]

Tipos de veículos automóveis elétricos	BEV	HEV
Propulsão	➤ Motor elétrico	➤ Motor elétrico ➤ Motor a combustão interna
Fonte de Energia	➤ Baterias ➤ Supercondensadores	➤ Baterias ➤ Supercondensadores ➤ Gasolina/Gasóleo/GPL
Características	➤ Emissões de gases poluentes nula ➤ Autonomia 300-400km ➤ Custo inicial elevado ➤ Possibilidade de recarregamento a partir da rede elétrica	➤ Emissões de gases poluentes muito reduzidas ➤ Autonomia depende do tamanho do depósito do combustível ➤ Estrutura complexa ➤ Possibilidade de recarregamento a partir da rede elétrica e a partir de postos de combustível
Questões ainda em estudo	➤ Gestão das baterias ➤ Aumento da autonomia ➤ Rápido recarregamento das baterias ➤ Gestão da utilização da potência máxima	➤ Gestão da complexa estrutura de múltiplas fontes de energia ➤ Gestão da bateria

2.3.1. Veículo elétrico a baterias – BEV (battery electric vehicle)

Nesta secção vai-se abordar mais aprofundadamente os veículos automóveis elétricos a baterias, este tipo de automóveis são a base de estudo do projeto aqui apresentado. Vão ser apresentadas várias tipologias e o modo de funcionamento.

2.3.1.1. Modo de Funcionamento

O veículo elétrico a baterias é basicamente constituído por um motor elétrico, uma fonte de energia e por uma transmissão de mecânica. Na figura 2 pode observar-se a constituição básica de veículo automóvel elétrico.

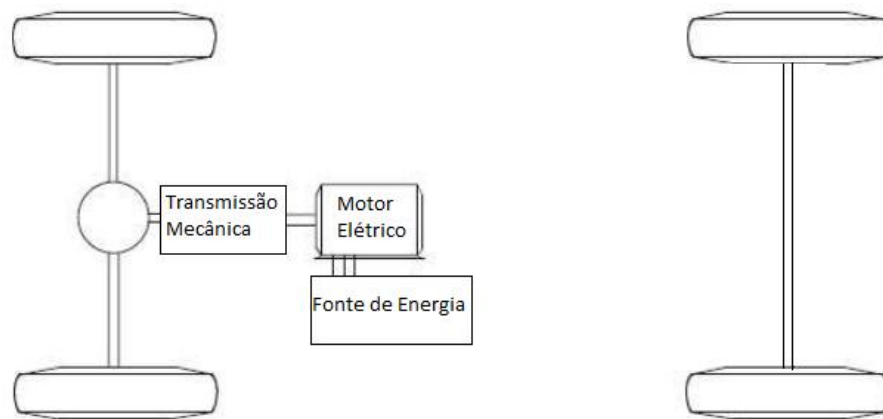


Figura 2 - Esquema básico de um veículo com motor elétrico[16]

Nos veículos automóveis elétricos o fluxo de energia que é distribuído a partir de cabos elétricos, apresentando desta forma perdas de rendimento muito inferiores a observada nos motores de combustão interna. Olhando mais detalhadamente a todas as ligações, pode-se passar da figura 2, onde genericamente se apresenta os três componentes básicos de um BEV, para uma série de componentes, tais como as baterias, controlador, conversor, inversor, caixa de velocidades e diferencial, que se pode ver na figura 3

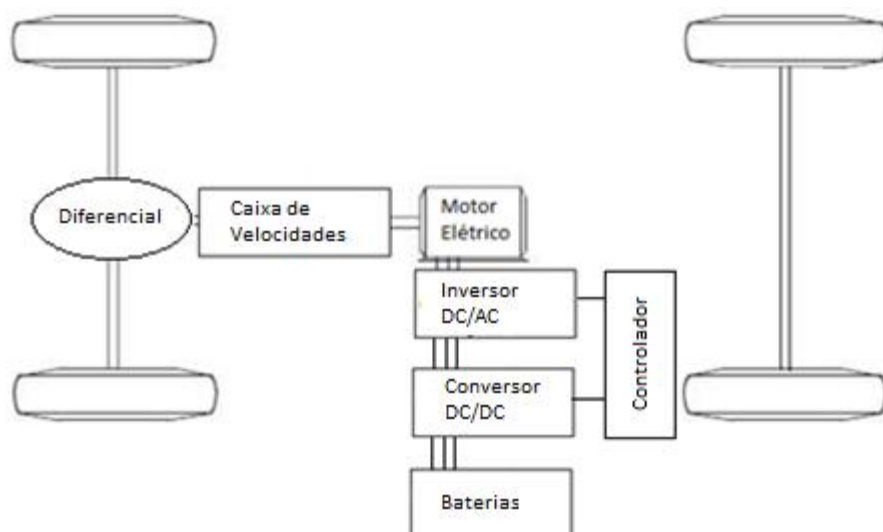


Figura 3 - Esquema detalhado de todos os componentes de um veículo elétrico

As **baterias** são o componente essencial a todo o funcionamento do veículo, são comparáveis ao depósito de combustível num automóvel normal, estas são a fonte de energia, nelas está armazenada toda a energia que irão ser necessárias para que o motor trabalhe. Em geral, quando se fala em baterias esta-se a falar de pequenas células de carga que depois de estarem juntas, ou em série, por forma a aumentar a tensão, ou em paralelo, para aumentar a corrente, formam o que se denomina por pack de baterias. Sendo este um dos subsistemas fundamentais, têm de ter um controlo rigoroso de todo o seu fluxo de energia. Quando as baterias estão em descarga sofrem um aumento de temperatura por passagem de corrente entre os elétrodos, esta temperatura tem de ser controlada para que não aconteçam acidentes, tais como rebentamento ou incêndios dos packs, este controlo é feito a partir de uma série de sensores de temperatura que estão ligados a um controlador, este emite um sinal a um controlador

que vai abrir o circuito, não permitindo que mais energia seja retirada das baterias. Outro controlo que tem de ser feito é o balanceamento do conjunto, cada bateria tem uma determinada resistência interna, e esta resistência vai influenciar a forma como o fluxo de energia é retirado do pack para o motor. No caso de se ter, por exemplo uma bateria com maior resistência interna que outra, o fluxo de energia da que apresenta menor valor será mais elevado, pois é mais fácil retirar energia. Isto provoca desequilíbrio no conjunto fazendo com que umas baterias descarreguem mais rápido do que outras, levando a ter gradientes de temperaturas muito diferentes.

O **conversor DC/DC** nesta montagem assume o papel de controlo da tensão e corrente que é pedida as baterias, adequando o nível de tensão, a tensão nominal do motor. Este conversor pode ser unidirecional ou bidirecional, no caso de se ter travagem regenerativa, necessita-se de ter um conversor de duas vias, para que se possa ter passagem de energia do motor para as baterias. No caso em estudo neste projeto optou-se por utilizar um conversor de uma só via.

Outro componente essencial é o **inversor DC/AC**, como na generalidade os motores elétricos para automóveis são de corrente alternada, é necessário ter um modificador de corrente a entrada do motor, para que seja alterada a corrente oriunda das baterias.

A gestão de todos estes componentes tem de ser feita de forma perfeita, tem de se ter um controlador que faça a leitura de todas as instruções que são pedidas pelo condutor do veículo e que as transforme num sinal elétrico e envie ao motor, pode dizer-se que o controlador esta dividido em três unidades. A primeira unidade é a de sensorização, esta faz a leitura de todos os parâmetros necessários ao controlo, a segunda unidade que funciona como um circuito de interface, adaptando os sinais vindos dos sensores, para que o processador faça a gestão final e envie os dados para o motor. No caso de se estar a reconverter um carro, com motor a combustão, para elétrico só se necessita de ter um controlo ao nível do acelerador, uma vez que, tanto os travões, como a direção são puramente mecânicas. Caso tivesse a fazer um carro de origem todos estes componentes mecânicos também poderiam ser controlados eletronicamente. Outra gestão que tem de ser feita é da temperatura do motor, tal como é feita nos packs de baterias, o motor possui sensores que fazem a leitura da temperatura interior do motor, estes dados vão servir para ativar ou desativar as ventoinhas de arrefecimento do circuito de água.

Após se concluir o estudo do fluxo de energia transmitida ao motor, vai ser abordado em seguida a temática da transmissão de potência as rodas.

O motor elétrico tem como funcionalidade converter energia elétrica em energia mecânica. Neste projeto começasse por abordar os vários tipos de motores elétricos usados nos EV. Em particular vai ser focado o estudo num motor elétrico trifásico, síncrono e sem escovas, o *EMRAX 228*, da firma *Enstroj*, que vai ser o utilizado no Fórmula elétrico.

Ao nível da transmissão de potência para as rodas pode ter-se seis tipos de tipologias, figura 4, isto é tem-se seis maneiras diferentes de montar o conjunto motor e transmissão mecânica.

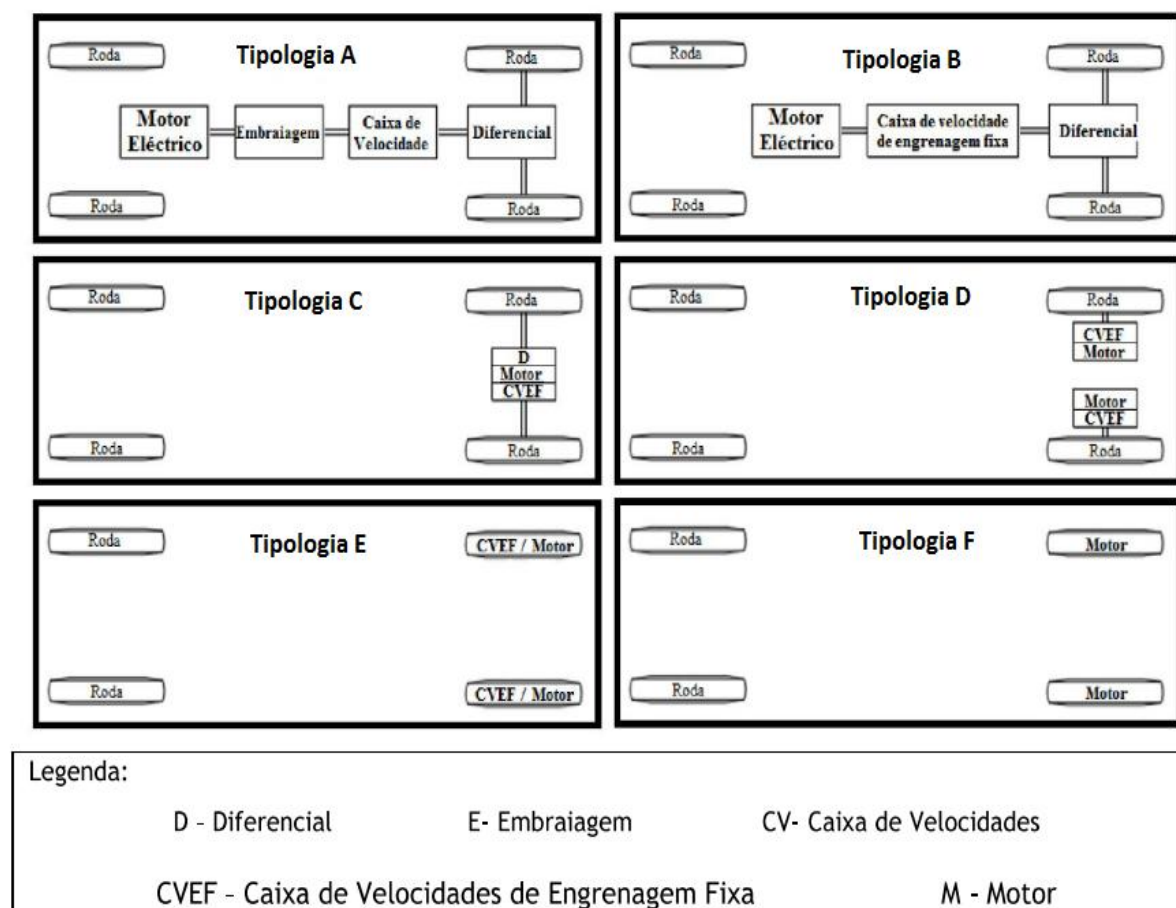


Figura 4 - Diversas tipologias de veículos automóveis eléctricos[16]

No esquema acima representado pode ver-se as diferentes tipologias de montagem do motor, no caso da tipologia A, figura 4, é a mais parecida a configuração já existente nos carros com motor a combustão. Esta forma de montagem do motor implica um controlo eletrónico mais avançado, pois com a mudança de velocidade e binário, promovida pela caixa de velocidades, vai ser imposto ao motor determinados esforços que têm de ser absorvidos pelo mesmo, desta forma vai ter de se controlar todo o fluxo de trabalho que existente, por forma a não danificar o motor eléctrico.

A tipologia B, figura 4, é a mais usual nos atuais veículos automóveis eléctricos, usando uma mudança apenas. Possui-se assim uma só desmultiplicação de binário, isto é bastante desvantajoso, pois para se poder obter velocidades elevadas tem de se comprometer o binário, sujeitando também a ter-se menor aceleração, ou então consegue-se ter o oposto, mais binário e menos velocidade. Esta forma de montagem é a que está ser alvo de estudo neste projeto, mas com uma pequena diferença, após a relação de caixa não existe diferencial, tendo assim uma ligação direta às duas rodas motrizes.

Na terceira tipologia apresentada, a C, é muito idêntica a B, mas com a diferença que em vez de se ter uma ligação entre motor, relação de transmissão e diferencial em linha, tem-se tudo no eixo de transmissão. Esta montagem é muito mais compacta e que ocupa muito menor volume.

As tipologias D e E, figura 4, são praticamente iguais, ambas são uma solução de diferencial eletrônico, isto é o efeito diferencial é feito por diferenças de velocidades dos motores, isto tudo é gerido pelos controladores do motor. A única diferença entre as duas tipologias é zona de montagem, a primeira é no eixo traseiro, ou dianteiro e a ligação será feita por um veio, no caso da segunda a montagem é feita na roda.

A última tipologia, F figura 4, tem o mesmo sistema de diferencial que as duas anteriores, e apresenta uma única diferença relativamente a estas, em vez de se ter uma relação de caixa a ligação dos motores à roda é direta. Logo a velocidade de rotação e o binário que o motor debitar é diretamente transmitido às rodas.

2.4. Sistema de propulsão

O sistema de propulsão num veículo elétrico é um dos fatores mais importantes na construção do carro. Quando se pretende escolher um motor para o automóvel vai ter de se ver vários aspetos relevantes, tais como, o peso do veículo, a velocidade máxima, o binário, a travagem e a autonomia. Após serem vistos estes aspetos ainda se irá estudar o volume e a forma da zona onde vai ficar alojado o motor e as baterias. Estes aspetos construtivos são extremamente relevantes neste projeto, uma vez que se está a usar um fórmula, onde o espaço é muito reduzido e que está projetado para acoplar um só motor, o que vem de origem.

Concluindo assim o estudo das características pretendidas para o veículo, passa-se à escolha do sistema de propulsão. Sabendo que existe uma dependência entre o controlador, o conversor, o inversor, as baterias e o motor, e sendo que este último é que afeta toda a escolha dos outros componentes, vai ser iniciado o estudo do sistema pela escolha do motor.

O motor elétrico é o componente fulcral num EV, existem quatro tipos de motores mais utilizados na indústria automóvel, figura 5, o motor DC, o motor de indução, o motor síncrono de ímanes permanentes sem escovas e o motor de relutância comutada.

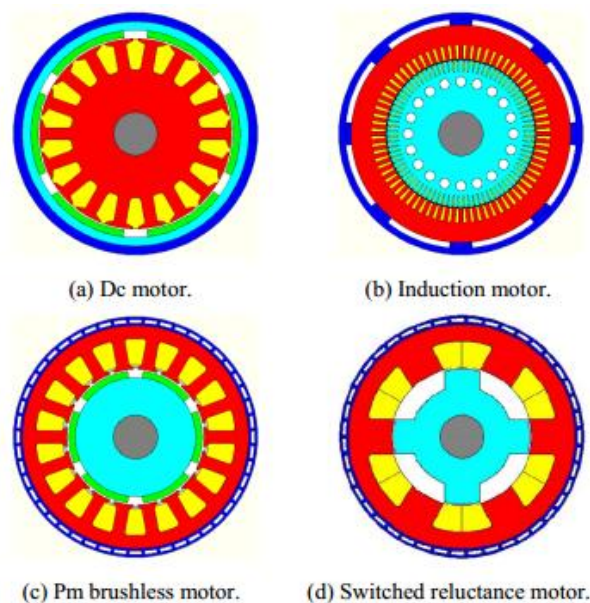


Figura 5 - Representação esquemática de quatro motores elétricos[18]

2.4.1. Motor DC

O motor DC é um dos que tem mais destaque dos quatro motores, pois apresenta uma relação velocidade e binário bastante interessante. Este motor tem como grande vantagem a sua facilidade de controlo eletrónico. Por outro lado, a construção deste motor é bastante volumosa, apresenta uma baixa eficiência e fiabilidade, e necessita de manutenção, devido a ter um comutador mecânico, as escovas. Em suma, pode-se dizer que este motor apresenta mais desvantagens do que vantagens, fazendo com que quase não seja muito utilizado nos veículos automóveis elétricos, salvo na Citroen Berlingo do grupo PSA. Adaptado de [18].

Na figura 6 pode observar-se a curva tipo de binário-potência de um motor DC.

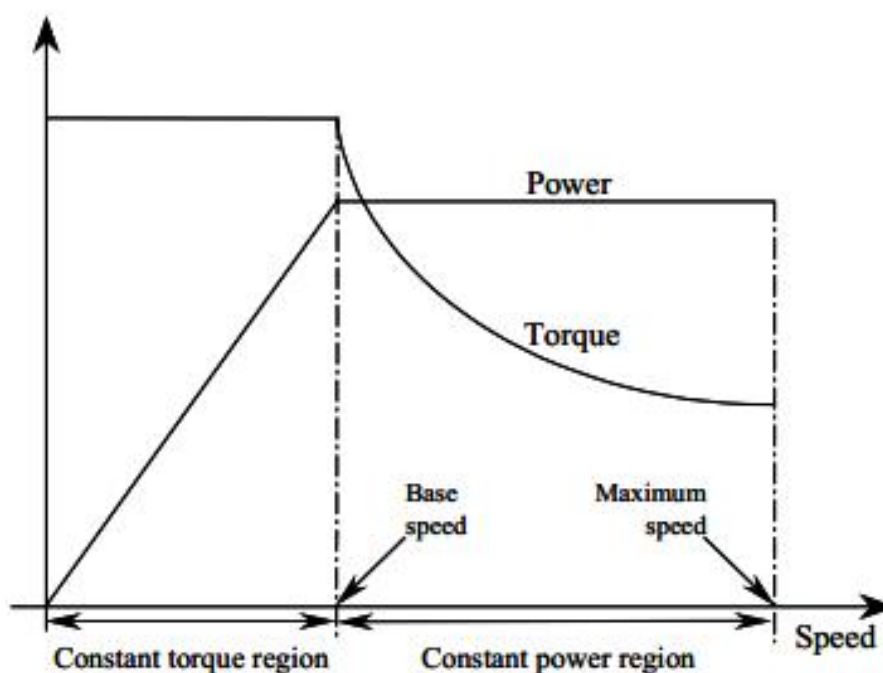


Figura 6 - Curvas de binário-potência de um motor DC [18]

2.4.2. Motor de Indução (IM)

Os motores de indução são os mais utilizados nos veículos automóveis elétricos, são adequados a trabalhar em ambientes industriais e unidades de tração. Estes motores apresentam diversas vantagens tais como grande fiabilidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e capacidade de trabalhar em ambientes hostis. Os IM são neste momento os que estão numa fase mais adiantada do desenvolvimento, comparativamente às outras tecnologias. As principais desvantagens destes motores são a sua grande perda de binário, a baixa eficiência, o baixo fator de potência e também do baixo fator de uso do inversor, o que é notório em altas velocidades, tal como se pode ver na figura 7, estas perdas são também bastante significativas quando se trabalha com motores de grande potência. Adaptado de [18].

Sendo estes os motores mais utilizados, tem vindo a ser desenvolvida uma série de técnicas de controlo eletrónico para conseguir colmatar todas estas desvantagens, uma das propostas é o uso de muti-fases de mudança de polo de indução.

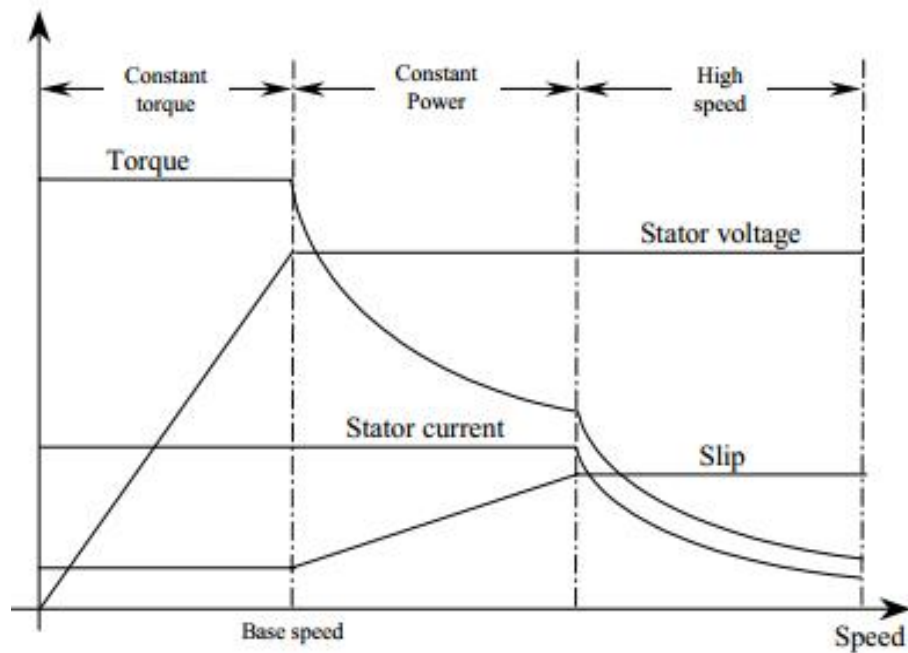


Figura 7 - Curvas de binário-potência de um motor de indução [18]

2.4.3. Motor síncrono de ímanes permanentes sem escovas

Os motores síncronos de ímanes permanentes são neste momento, a par dos motores de indução, os mais comuns na indústria automobilística. Estes apresentam um conjunto de vantagens, que os diferencia e torna aliantes quando se escolhe um motor para um veículo elétrico.

As diferenças mais vantajosas para esta tecnologia são o seu peso e volume reduzidos mesmo para grandes potências, a sua alta densidade de potência, grande eficiência, e grande poder de dissipação de calor. Nestes motores é possível aumentar a velocidade máxima em três a quatro vezes, relativamente a velocidade base, apenas alterando alguns parâmetros do controlador, mas caso a velocidade aumente em demasia pode ocorrer a perda de eficiência, por desmagnetização do motor. Adaptado de [18]. Na figura 8 pode visualizar-se a curva binário-potência de um motor genérico de ímanes permanentes sem escovas.

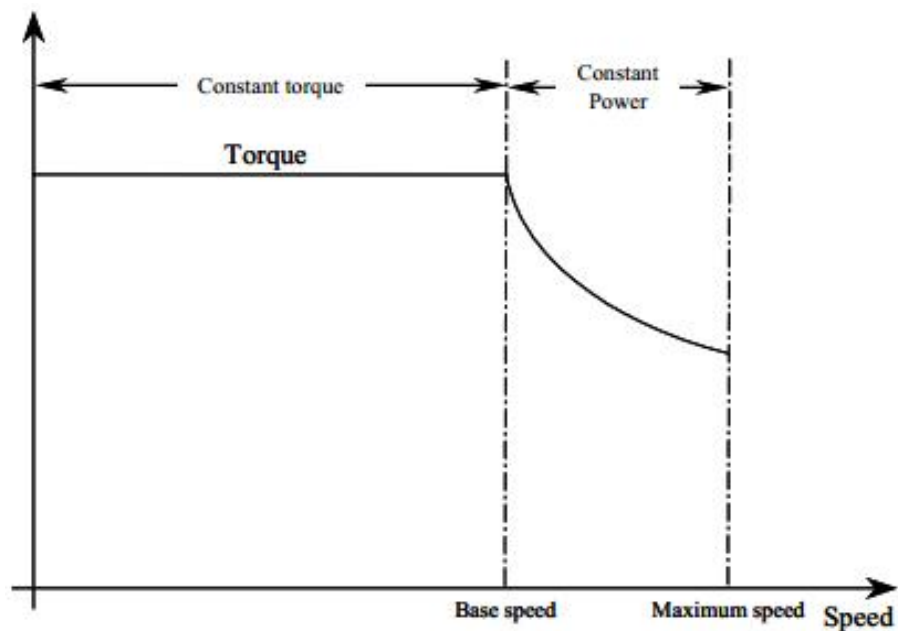


Figura 8 - Curvas de binário-potência de um motor de síncrono de ímanes permanentes [18]

Existem várias configurações possíveis para este tipo de motores, estas dependem da posição do íman permanente. Existe uma montagem em particular, que é chamada de híbrida, onde o campo magnético é gerado no intervalo entre o íman e o enrolamento. Esta tecnologia é a que apresenta maior gama de velocidades e eficiência global, sendo também a que tem maior complexidade de construção. Devido as suas características este tipo de motor é adequado a montagem direta a roda, tal como vimos nas tipologias E e F, pode ver-se na figura 9 este tipo de montagem.

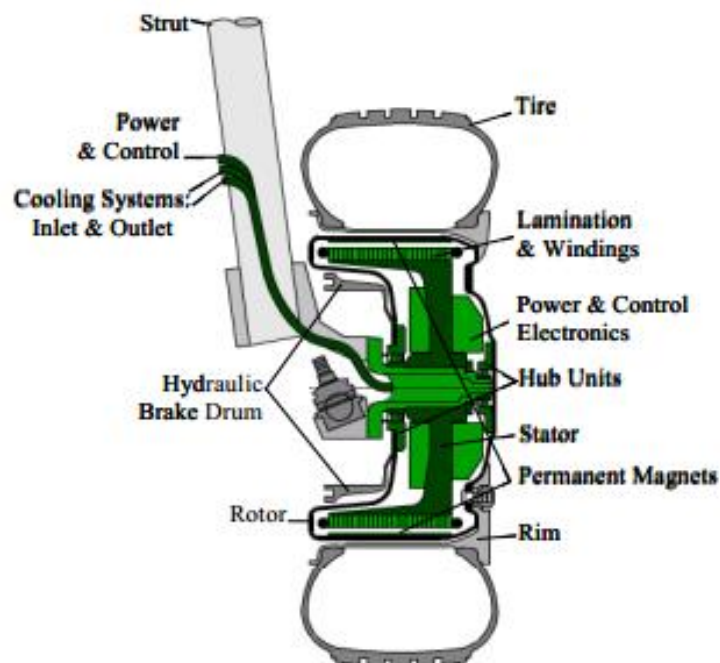


Figura 9 - Representação esquemática da montagem de motor síncrono de ímanes permanentes na roda de um veículo[18]

2.4.4. Motor de relutância comutada

Este tipo de tecnologia ainda está em fase embrionária, mas tem-se notado um aumento de interesse no seu desenvolvimento. Os motores apresentam uma construção muito simples e robusta, são de fácil controle eletrônico, e são tolerantes a algumas falhas do sistema. Outras duas grandes características são a sua relação binário e velocidade, e a sua capacidade de trabalhar durante um longo período de tempo a potência nominal.

As desvantagens destes motores são o ruído tanto acústico como nas ligações elétricas, o que faz com que exista uma geração de interferência eletromagnética, e também a necessidade de ter um conversor mais complexo. Adaptado de [18]. Na figura 10 pode ver-se a curva de binário-potência de um motor de relutância comutada.

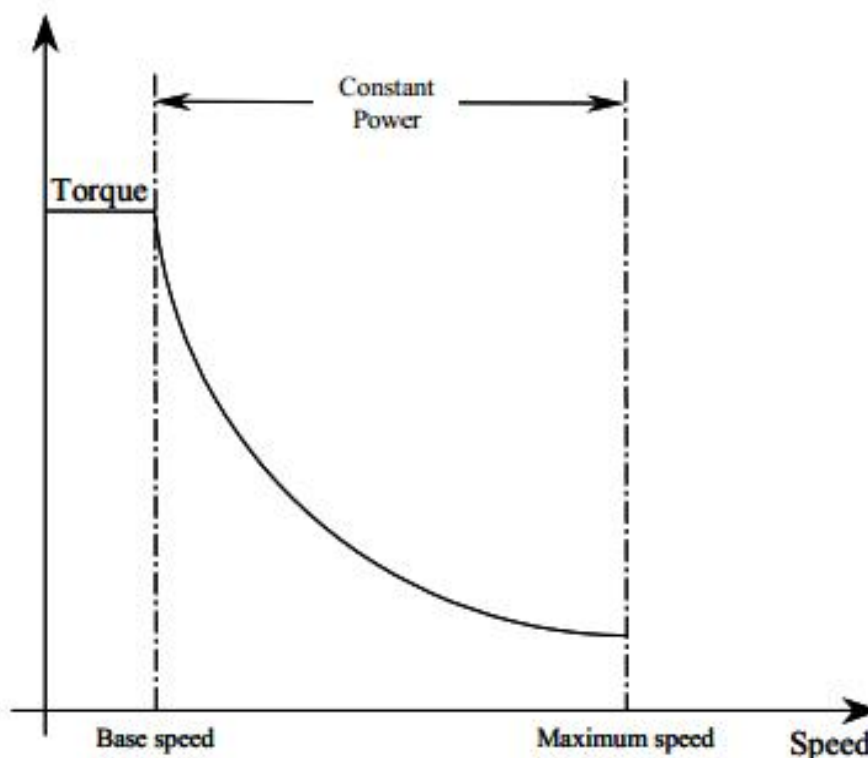



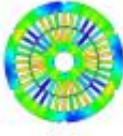






Figura 10 - Curvas de binário-potência de um motor de relutância comutada [18]

Por esta análise comparativa entre vantagens e desvantagens, pode então concluir-se que estes motores ainda não são os ideais para a aplicação nos veículos automóveis elétricos.

2.4.5. Comparação entre os 4 motores

Como acima mencionado a escolha de um motor elétrico é influenciada pela sua velocidade, binário, eficiência e a sua própria arquitetura, destas características, pode-se concluir que os motores que mais se adequam são os de indução e os síncronos sem escovas. Como podemos verificar na tabela 2, é apresentado um quadro comparativo dos quatro motores, escalonado de 1 a 5, em que um é a pontuação mais baixa e cinco a mais elevada. Adaptado de [18]

Tabela 2 - Comparação entre 4 motores elétricos[18]

<div> <div>Propulsion Systems</div> <div>Characteristics</div> </div>	 DC	 IM	 PM	 SRM
Power Density	2.5	3.5	5	3.5
Efficiency	2.5	3.5	5	3.5
Controllability	5	5	4	3
Reliability	3	5	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
Cost	4	5	3	4
Σ Total	 22	 27	 25	 23

Com a análise desta tabela pode-se concluir que os motores síncronos sem escovas são os que apresentam melhor potência e eficiência, por outro lado são os têm o preço mais elevado. Do ponto de vista do controlo eletrónico, fiabilidade, avanço na tecnologia, os motores de indução têm melhores pontuações. No somatório final os motores IM têm melhor classificação, sendo que com o avanço da tecnologia nos motores PM nos próximos anos, poder-se-á vir a ter uma inversão desta realidade.

Entre estes quatro motores, foi escolhido o motor de síncrono de ímanes permanentes sem escovas para o desenvolvimento deste projeto, mais adiante poder-se-á visualizar o motor escolhido em mais pormenor.

2.5. Conversores de Potência

Nesta secção vão ser abordadas algumas tipologias de conversores de potência utilizados no controlo de veículos automóveis elétricos, sendo que todo este estudo se baseia na referência [19].

Os conversores de potência podem ser divididos em quatro tipos, CC/CC, CA/CC (retificador), CC/CA (inversor) e o CA/CA. Qualquer um destes tem como função fazer a interface e o controlo de fluxo de potência entre dois sistemas.

Quando se projeta um conversor para um carro elétrico tem de se ter em atenção determinadas características, tais como o peso, a eficiência, o volume, a interferência magnética, a ondulação da corrente e o fluxo de potência.

Entre as características acima referidas, as que melhor se enquadram e por isso também os mais usuais são os conversores CC/CC, que são os que fazem a ligação entre dois sistemas de corrente contínua. Estes conversores podem ser unidirecionais ou bidirecionais, dependendo

do sentido do fluxo de potência. No caso de se ter um unidirecional, só existirá uma passagem de corrente das baterias para o motor, no caso de se pretender ter aproveitamento da energia, na desaceleração e na travagem, tem de se optar por um bidirecional, para que se possa ter uma passagem de corrente do motor, que neste caso funciona como gerador, para as baterias.

Dentro dos conversores CC/CC existem dois tipos, os de dois quadrantes e os de quatro quadrantes. O primeiro permite converter a tensão contínua da bateria para outra gama de tensão durante o tempo de tração ou travagem regenerativa permite inverte o fluxo de energia.

O de quatro quadrantes são utilizados para o controlo reversível da velocidade, com regeneração, estes quadrantes podem ser observados na figura 11, e as suas características podem ser vistas em mais detalhe na tabela3

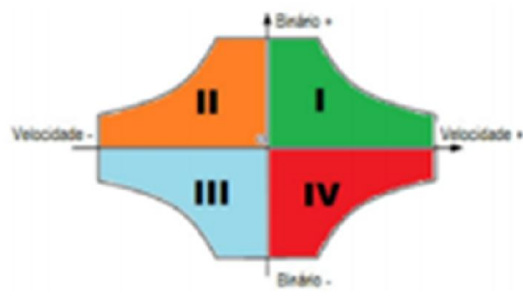


Figura 11- Características binário-velocidade do conversor de potência em ponte completa

Tabela 3 - Característica do conversor de potência em ponte completa

Função	Quadrante	Velocidade	Binário	Potência saída
Motor (sentido horário)	I T1(on) e T4(on)	Positiva (+)	Positivo (+)	Positiva (+)
Travagem regenerativa (sentido horário)	IV D2(on) e D3(on)	Positiva (+)	Negativo (-)	Negativa (-)
Motor (sentido anti-horário)	III T2(on) e T3(on)	Negativa (-)	Negativo (-)	Positiva (+)
Travagem regenerativa (sentido anti-horário)	II D1(on) e D4(on)	Negativa (-)	Positivo (+)	Negativa (-)

2.6. Inversores

Os inversores CA/CC são de uso muito corrente, por exemplo em *drivers* de corrente alternada, fontes de potência de corrente contínua e equipamentos de compensação harmónica. Em geral os alternadores mais vulgares e mais antigos utilizavam díodos de potência para efetuarem a retificação da corrente alternada para contínua, mas como contrapartida estes

apenas permitem um fluxo de potência unidirecional e provocam um alto nível de harmônicos na corrente de entrada.

Em alternativa aos díodos tem-se os inversores trifásicos, que mesmo apresentando uma modelação complexa são vantajosos, pois apresentam uma eficiência próxima dos 98%, possuem baixa distorção harmónica, possibilitam a regulação do fator de potência de entrada e uma redução no tamanho do condensador do filtro CC[20].

Existem 4 tipos de tipologias básicas de inversores, apresentadas na figura 12, que são utilizadas nos veículos automóveis elétricos e híbridos.

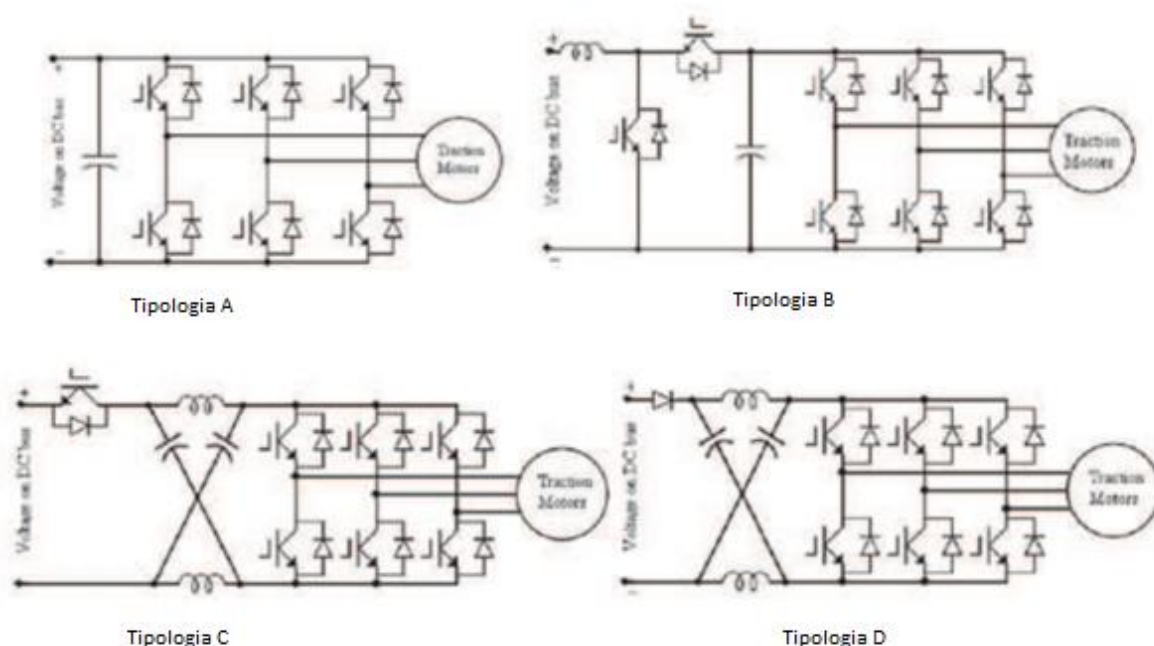


Figura 12 - 4 tipologias básicas de inversores[21]

A tipologia A é a base de todas as restantes, variando conforme o tipo de aplicação em que vais ser utilizada. A configuração B é a mais comum, é um inversor bidirecional. Durante o regime de tração o inversor faz elevar a tensão fornecida ao motor, quando o motor funciona como gerador, durante as travagens e desacelerações, o inversor baixa a tensão da corrente.

As últimas duas tipologias são as denominadas de *Z-Source*, e pode ser aplicada a qualquer tipo de conversor (CC/CC, CC/CA e CA/CA) aumentando o seu desempenho, diminuindo assim o número de componentes. Desta forma vai-se ter menores perdas de carga, aumentando o rendimento e reduzindo os custos[21].

2.7. Controlador

Os controladores eletrónicos têm um papel fundamental no correto funcionamento dos veículos automóveis elétricos, estes fazem a gestão e o controlo de todos os componentes. Como já referido anteriormente, estes possuem uma unidade de sensorização, outra de processamento e outra de envio de dados.

Quando se fala em controladores tem de se abordar os controladores dos conversores e inversores, pois estes é que fazem a gestão do motor, são eles que fazem variar a tensão e corrente fornecida ao motor, fazendo assim variar o binário e a velocidade do mesmo.

O controlo de conversores é efetuado por modelação de sinais (PWM – *Pulse width modulation*), esta técnica de modelação por largura de pulso, determina o tempo e a ordem de comutação de cada interruptor, ajudando para a eficiência e qualidade da corrente fornecida. No caso de se estar a fazer um controlo de baixa precisão, toda a ação do controlador passa pela frequência de alimentação do motor, por exemplo se for aumentada a frequência, o fluxo vai diminuir e por sua vez o binário desenvolvido também diminui [20].

Outra estratégia de controlo é o SVM – *Space Vector Modulation*, esta técnica é das mais populares e importantes pois permite comandar os inversores trifásicos de tensão. Este controlo apresenta vantagens ao nível da tensão, pois permite que esta seja mais elevada, e tem menor distorção harmónica. O princípio de funcionamento passa por tratar a tensão como um vetor de amplitude constante e rotação a frequência constante. Em suma, este método consegue ter 15% mais elevada tensão de saída, maior eficiência, e menor número de comutações dos semicondutores [22].

Comparando as duas estratégias apresentadas podemos concluir que a SVM aproveita melhor as fontes de tensão, e dela consegue-se tirar melhores performances e eficiência.

2.8. Sistemas de armazenamento de Energia

Após terem sido abordados todos os componentes essenciais de transporte, modificação, retificação e transformação de energia elétrica, tem que se falar agora da tecnologia que armazena esta energia. Estes sistemas podem ser constituídos por baterias apenas ou por um conjunto de baterias e supercondensadores. Qualquer um destes sistemas vai ter de ter um pequeno controlo eletrónico, que faça a gestão de carga e descarga destes componentes.

Na escolha de um sistema de armazenamento de energia tem de se ter em consideração dois parâmetros essenciais - a densidade de energia (Wh/kg) e a densidade de potência (W/kg), estes fatores influenciam a autonomia e a capacidade de aceleração. Outros fatores, tais como a rápida carga, a capacidade de descargas completas, ciclo de vida longo, a taxa de carga e de auto-descarga, a carga de alta eficiência, segura, livre de manutenção, baixo custo e amiga do ambiente[23].

Para que os dois parâmetros essenciais tenham o maior valor possível tem de se recorrer a um sistema complexo, com múltiplas fontes de energia. Como se pode constatar pelo gráfico 1, para se conseguir atingir uma densidade de energia elevada, vamos ter de sacrificar a densidade de potência, e vice-versa.

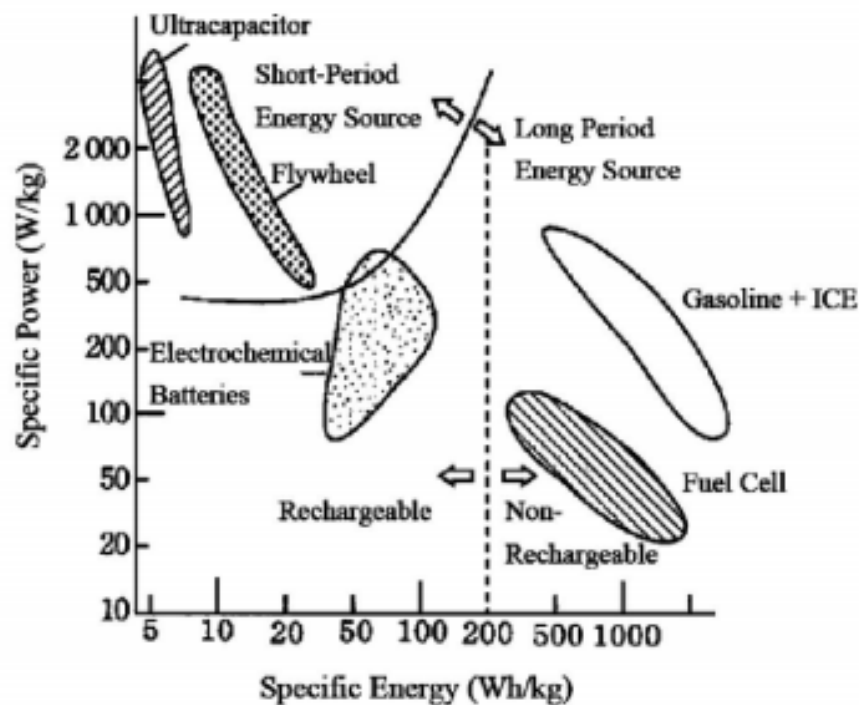


Gráfico 1 - Densidade energética vs. Potência específica para diferentes tipos de tecnologias

No caso dos veículos híbridos, o uso de múltiplas fontes de energia está resolvido, pois o motor a combustão serve como fonte recarregável, e para além disso pode-se utilizar sistemas como a travagem regenerativa, para que se possa otimizar ao máximo o uso do motor elétrico, permitindo assim diminuir os consumos e as emissões. No caso dos automóveis puramente elétricos, só o uso de tecnologias como as anteriormente citadas não chega, tem-se então de optar por ter um sistema com baterias e/ou supercondensadores.

2.8.1. Baterias

As baterias são dispositivos que convertem energia química em energia elétrica. Estas armazenam energia, em uma ou mais células eletroquímicas. A escolha das baterias tem de passar pela consideração de determinados parâmetros, tal como a sua capacidade, o estado de carga, e as já referenciadas energia específica e potência específica.

A capacidade da bateria vem definida em amperes-hora (Ah), mas este valor pode variar dentro de cada célula, pois esta medida é função da corrente e da taxa de descarga. Por este motivo os fabricantes especificam em cada bateria o número de Ah e a taxa de descarga. Por exemplo, 10Ah a C/5, isto significa que esta bateria tem 10Ah durante cinco horas, com uma taxa de descarga de $10/5=2$ A.

O estado de carga da bateria (SOC) é um dos fatores a ter em conta na escolha de baterias. Este parâmetro indica, em percentagem, a relação da carga elétrica que se pode ser entregue pela bateria a uma corrente (I), e a capacidade nominal desta.

A energia específica é uma relação entre a energia fornecida e o peso, já a potência específica relaciona a potência com o peso ou com o volume.

Na indústria automóvel as principais tecnologias de baterias utilizadas são as de hidreto metálico de níquel (NiMH) e iões de lítio (LI-Ion). Pela tabela 4 e pelo gráfico 2 pode-se ver o motivo pelo qual estas duas baterias são as mais utilizadas. Adaptado de [23-25].

Tabela 4 - Comparação entre vários tipos de baterias comercializadas. Adaptado de[26-28]

Tipo de Bateria	Energia Específica (Wh/Kg)	Potência Específica (W/kg)	Ciclos de vida	Eficiência (%)	Auto descarga (% p/48h)	Custo (U\$/kWh)
Bateria Chumbo Ácido						
Chumbo ácido	35	180	1000	>80	0,6	60
Chumbo ácido avançado	45	250	1500	-	-	200
Válvula regulada	50	150	700+	-	-	150
Folha de Metal	30	900	500+	-	-	-
Baterias de Níquel						
Níquel Ferro	50-60	100-150	2000	75	3	150-200
Níquel – zinco	75	170-260	300	76	1,6	100-200
Níquel- Cadmio	50-80	200	2000	75	1	250-300
Níquel metal hídrico	75-95	200-300	<3000	70	6	200-250
Baterias de Lítio						
Lítio - sulfureto de ferro	150	300	1000+	8	-	110
Lítio - fosfato de ferro	120	200-4500	>2000	-	-	350
Iões de Lítio - polímero	130-225	260-450	>1200	-	-	150
Iões de lítio	118-250	200-430	2000	>95	-	150
Lítio - titânio	80-100	4000	18000	-	-	2000
Lítio - Ar	1800	-	-	-	-	-
Baterias de Metal-Ar						
Alumínio – ar	220	60	-	-	-	-
Zinco – ar	460	80-140	200	60	-	90-120

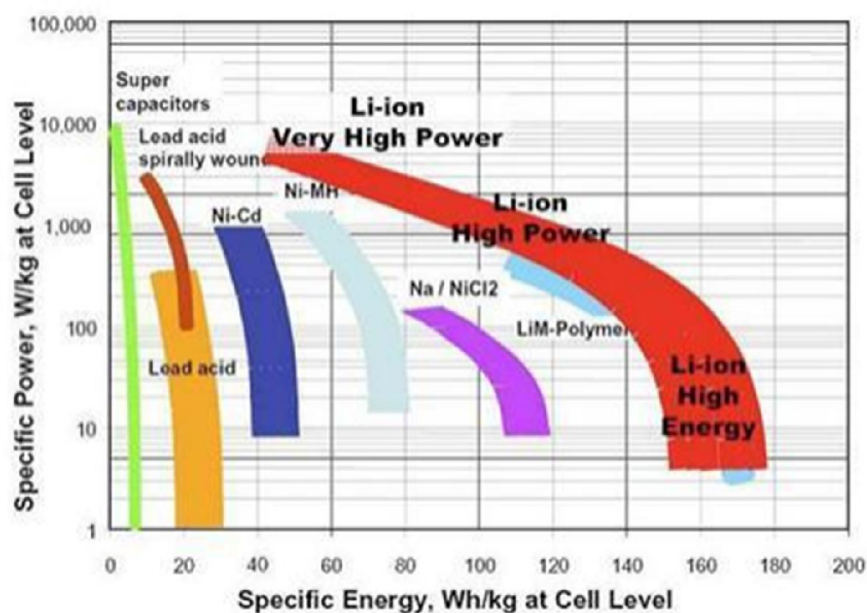


Gráfico 2 - Densidade energética vs. Potência específica para diferentes tipos de baterias [29]

As baterias NiMH são as mais utilizadas veículos híbridos, estas têm como principais pontos fortes, o elevado número de ciclos de vida e a sua segurança. Por outro lado apresenta baixa densidade de potência e energia, e a nível de custos ainda é elevada, e ainda não há grandes perspectivas de diminuição do preço.

As baterias de íons de lítio têm vindo a conquistar uma boa parte do mercado dos carros elétricos, pois apresentam vantagens significativas no campo da densidade de energia e potência, mas em contrapartida têm um controlo de tensão e temperaturas mais complexas. Este tipo de baterias neste momento debate-se com o estudo do melhor compromisso entre os vários fatores relevantes na sua escolha. Por exemplo quando se aumenta a densidade potência, tem-se de elevar a tensão, o que vai reduzir o tempo de vida e a segurança e também aumentar os custos. Outro exemplo é se se pretender aumentar a densidade de energia, vai ter de se sacrificar a densidade de potência, que terá tendência a diminuir.

Após a análise às principais baterias usadas e às suas características, tem-se também de referir todo o controlo que é exigido no balanceamento destas. Quando se faz um pack de células de baterias tem de se ter em conta que nem todas têm a mesma resistência interna, isto faz com que exista uma anormal distribuição de energia fornecida ao sistema. Tudo isto se torna crítico quando se tenta juntar no mesmo pack cerca 50 ou mais baterias, caso não haja um controlo otimizado da descarga das baterias. Ao fim de um determinado ciclo de trabalho cada bateria tem diferentes quantidades de energia, logo vão ter desgastes diferentes, e vai haver umas que vão ficar com menos ciclos de vida que outras, este desgaste pode ser visualizado pela análise do gráfico 3.

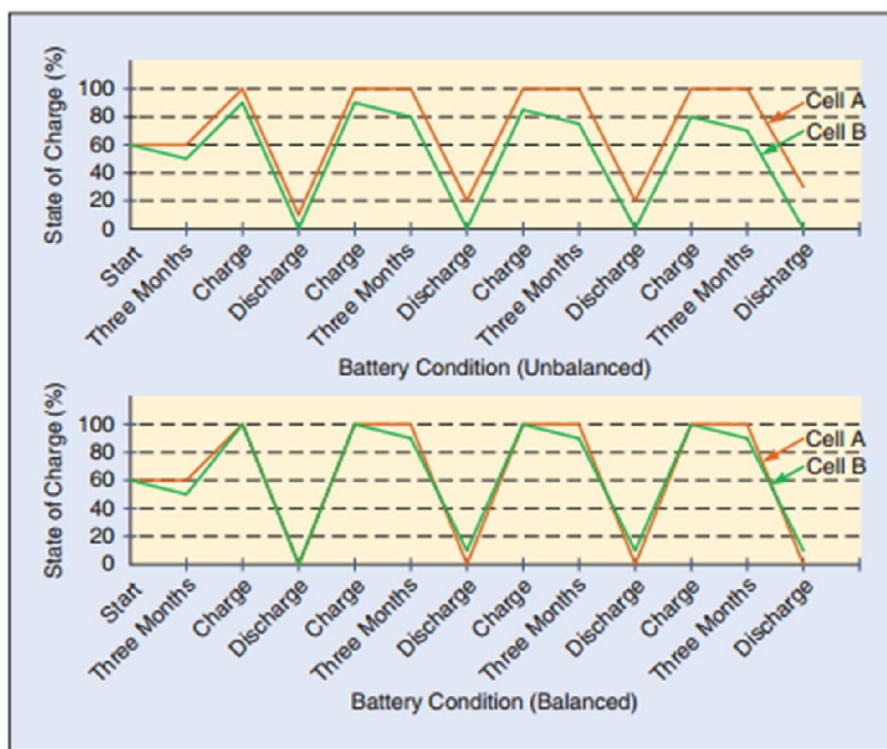


Gráfico 3 - Comparação entre uma bateria com e outra sem balanceamento [30]

Outro fator crítico do mau balanceamento, ou mesmo inexistente é a influência da temperatura, como nem todas as baterias estão a fornecer o mesmo, a sua temperatura de funcionamento também não é a mesma. Logo vai-se ter num pack diferentes temperaturas e isso vai influenciar no modo de funcionamento e pode mesmo ser crítico caso haja diferenças tão grandes que possam levar ao reventamento ou perigo de ignição de todo o conjunto.

2.8.2. Supercondensadores

Devido às limitações das baterias, no campo da densidade de potência e do reduzido número de ciclos de vida, a utilização de supercondensadores acrescenta uma mais-valia a construção de um veículo elétrico.

A elevada densidade de potência, podendo mesmo chegar aos 3 kW/kg, o tempo reduzido de carregamento, e o elevado número de ciclos de carga/descarga, fazem dos supercondensadores ótimos aliados das baterias. Numa normal situação de condução é exigido por vez picos de binário e velocidade, estes picos quando aplicados a veículos automóveis elétricos, correspondem a rápidas e grandes descargas de energia no motor, estes picos em caso das baterias já não estarem completamente carregadas, não vão conseguir ser fornecidos ao motor, pois já não existe energia suficiente nas baterias para o fazer. Logo a utilização de supercondensadores torna-se uma alternativa muito viável, pois podem auxiliar durante estes pedidos de picos de corrente, e proteger as baterias, dando-lhes mais durabilidade e ciclos de vida. Adaptado de [27]. Realçando ainda mais a importância dos supercondensadores deve ser referido que estes trabalham a tensões muito variáveis, enquanto as baterias trabalham quase sempre em tensão constante.

O uso de supercondensadores é bastante útil quando se utiliza travagem regenerativa, pois a energia cinética aproveitada, e convertida em energia elétrica é utilizada para recarregar os supercondensadores, pois como referido anteriormente estes têm tempos de carregamento muito reduzido.

(Página em branco)

Capítulo 3 – Modelo Físico do Fórmula Glória B4

O estudo da conversão do monolugar para elétrico, passa por um estudo prévio da construção estrutural do fórmula e da sua motorização.

Para isso começa-se por estudar o monolugar que foi construído pela marca *Glória Cars*. O modelo em estudo é o B4, este foi o primeiro modelo a ser feito pela marca, com o objetivo de incentivar novos participantes no desporto automóvel. Sendo um carro leve e de simples construção, com um motor não muito potente, podendo assim ser um monolugar aliciante para os novos pilotos. Na figura 13 pode-se ver uma imagem do monolugar.



Figura 13 - Fórmula Glória B4

O fórmula é construído com base num chassi de estrutura tubular de baixo peso, a sua carroceria é feita em fibra de vidro, sendo que o fundo é de Alumínio. Os apêndices aerodinâmicos são contruídos em alumínio e num composto de madeira. O motor deste carro é montado numa posição ligeiramente a frente do eixo traseiro, com a caixa de velocidades acoplada ao bloco do motor.

A motorização que está presente neste veículo é a mesma da moto Yamaha Fazer a quatro tempos, com 143 cv às 10000 rpm e com um binário máximo de 108 Nm às 7500 rpm. Este motor é de 1000cc de cilindrada, quatro cilindros, com cinco válvulas por cilindro e dupla árvore de cames, este motor ainda é a carburação, tendo 4 carburadores de 37mm.

3.1. Cálculo do binário e potência à roda

A desmultiplicação de binário no fórmula é feita por uma caixa sequencial de 6 velocidades e a sua transmissão é realizada por uma corrente, com relação intercambiável. Pode ver se na tabela 5 as relações de caixa da mota, onde se tem a relação primária, que é a relação de transmissão entre o eixo da cambota e o veio primário da caixa de velocidade, e também se pode ver as relações de todas as mudanças.

Tabela 5 - Relações de caixa do Fórmula Glória B4 [31]

Redução Primária		1,581
Velocidade	1ª	2,500
	2ª	1,842
	3ª	1,500
	4ª	1,333
	5ª	1,200
	6ª	1,115

O fórmula *Glória* ainda tem uma relação final, ou secundária, entre o veio de saída da caixa de velocidade e o eixo de transmissão. Esta relação foi calculada com base na medição dos diâmetros das rodas dentadas, figura 14, tanto do veio de saída como da cremalheira que faz a ligação ao eixo de transmissão.

Os seus diâmetros são:

- Roda dentada do veio de saída – $D_1 = 42 \text{ mm}$
- Cremalheira de ligação ao eixo – $D_2 = 106 \text{ mm}$
- Relação secundária – $\frac{D_2}{D_1} = 2,524$

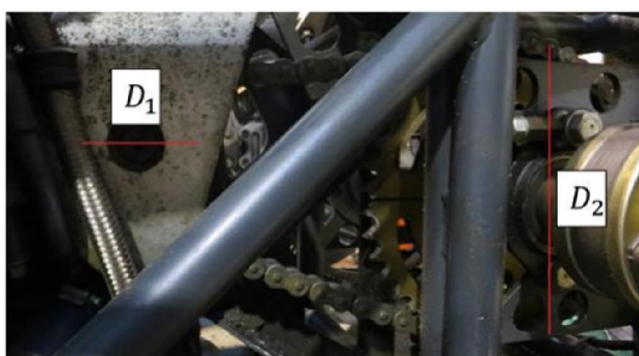


Figura 14 - Fotografia da correia de transmissão, do pinhão e da cremalheira, e os respectivos diâmetros

Tendo em conta todas as reduções entre a saída da cambota até ao eixo do motor, podemos calcular a relação total (i). Esta relação vai ser função da relação primária, da relação de caixa e da secundária. Por exemplo, quando se calcula a relação total para a primeira mudança obtém-se o seguinte valor:

$$1,581 \times 2,5 \times 2,524 = 9,975$$

Por este valor pode-se constatar que o movimento de rotação da roda é cerca de 10 vezes inferior ao da cambota do motor, isto na primeira mudança.

Como se pode ver na tabela 6 quando se muda a mudança para uma superior, obtém-se uma relação de caixa total inferior, isto faz com que se tenha uma velocidade de rotação superior na roda, e por consequência obtém-se um binário inferior.

Tabela 6 - Relação de transmissão total do fórmula Glória

Mudança	Relação total (i)
1 ^a	9,975
2 ^a	7,350
3 ^a	5,985
4 ^a	5,319
5 ^a	4,788
6 ^a	4,499

Assim sendo quando se está na primeira mudança tem-se a menor velocidade de rotação na roda, mas o maior binário, por outro lado, quando se tem engrenada a sexta mudança obtém-se a velocidade maior, de cerca de 4,5 vezes menos que a da cambota e o também se tem o menor binário.

Quando se faz o cálculo da velocidade e do binário transmitido às rodas existe sempre perdas associadas as sucessivas passagens do movimento, tanto nas engrenagens, como no eixo de transmissão e no cubo das rodas, por este motivo foi considerado um rendimento de transmissão (η_t) de 85%. Este valor escolhido é um compromisso entre um valor demasiado otimista, por exemplo um rendimento de 95%, como os carros de fórmula 1 conseguem, e um pessimista, que é considerar um valor de um carro de gama média, a rondar os 75%.

Para se saber a potência e binário do motor foi utilizado o gráfico de potência-binário, gráfico 4 que é fornecido pela *Glória Cars*. Deste gráfico pode retirar-se, para uma determinada gama de rotações, das 3000 RPM até as 11500 RPM, os respetivos valores de binário, curva a azul, e potência, curva a rosa. No eixo das abcissas temos as rotações, em RPM, no eixo do lado esquerdo têm-se a potência, em cv, e do lado oposto o binário, em Nm.

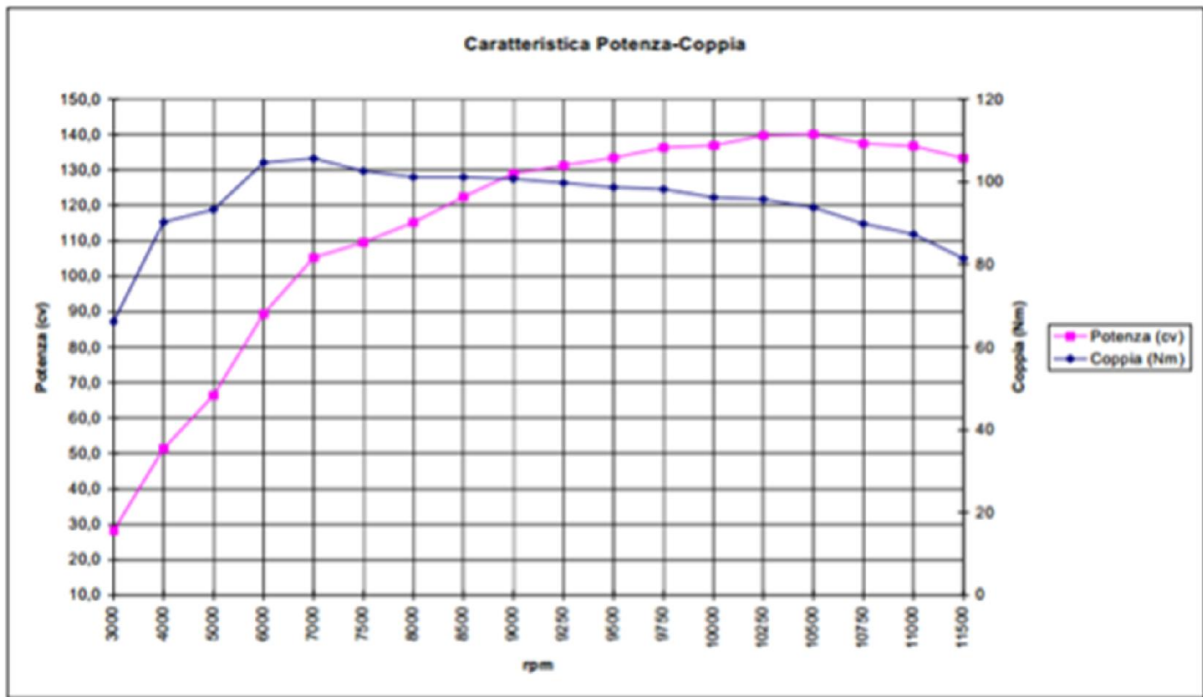


Gráfico 4 – Curvas de potência-binário do fórmula Glória B4 [32]

Outro fator que influencia a potência e binário à roda é o tamanho do pneu e da jante utilizados, este pode ser visto como a última razão de desmultiplicação existente. No caso do fórmula a jante e o pneu que tem é o 215/50/R13, ou seja, tem 215mm de largura, a altura de perfil do pneu é 50% do valor da largura e a jante é de 13 polegadas. Na tabela 7 pode ver-se o raio e o perímetro total do conjunto.

Tabela 7 - Características gerais da roda do fórmula

Djante [polegadas]	13
Largura [mm]	215
Altura perfil pneu [mm]	107,5
Raio total [m]	0,273
Perímetro [m]	1,713

A partir de todos os dados até agora referidos e com auxílio das equações abaixo descritas, consegue-se obter os valores de velocidade e binário à roda.

$$r_t[m] = \frac{D_{jante}[polegadas] \times 0,0254}{2} + \frac{h_{pp}}{100} \times largura[mm] \times 10^{-3} \quad 1$$

$$P[m] = 2\pi \times r_t[m] \quad 2$$

$$Pot[kW] = 0,735 \times Pot[cv] \quad 3$$

$$n_{final}[rpm] = \frac{rpm_{motor}}{i} \quad 4$$

$$v_{roda}[m/s] = \frac{n_{final}}{60} \times P \quad 5$$

$$v_{roda}[m/s] = v_{roda}[m/s] \times 10^{-3} \times 3600 \quad 6$$

$$Bin_{roda} = \frac{\eta_t \times Pot[kW]}{\frac{2\pi \times n_{final}[rpm]}{60}} \times 1000 \quad 7$$

Os valores obtidos a partir da aplicação destas fórmulas podem ser vistos em detalhe no anexo 1. Nesse documento estão presentes para todas as mudanças, num seguimento de 500 em 500 rpm, os valores de binário, velocidade, a rotação final e a potência à roda. Os valores sombreados a azul são os de leitura direta do gráfico 4, todos os outros são valores calculados.

De salientar o primeiro valor de binário a roda para a primeira mudança, de 575,68 Nm. E também a velocidade máxima de 265,64 km/h, que é atingida na sexta mudança.

3.2. Cálculo do binário de arranque

No dimensionamento de um motor elétrico, para aplicação num veículo com motor a combustão, um dos fatores mais preponderantes e críticos é o binário de arranque. Este valor de binário nada tem a ver com o tipo de motor que tem o automóvel, mas sim com todas as forças que estão envolvidas no mesmo.

O estudo do binário de arranque tem de ser realizado para a pior situação possível, neste caso se o carro estiver numa subida, uma vez que consiga superar este valor de binário, para qualquer situação, como seja a plano ou mesmo a descer, irá sempre conseguir arrancar.

No cálculo deste valor tem-se de fazer determinadas considerações, tais como a aproximação da aceleração inicial. O valor fornecido pela *Glória Cars* do tempo de aceleração dos 0-100 km/h, não serve como aproximação para o binário de arranque, pois este valor está muito longe da realidade da aceleração inicial do carro. Quando o carro passa dos 0 km/h até aos 100 km/h o gráfico de aceleração é linear, tal como pode-se comprovar pelo gráfico 5.

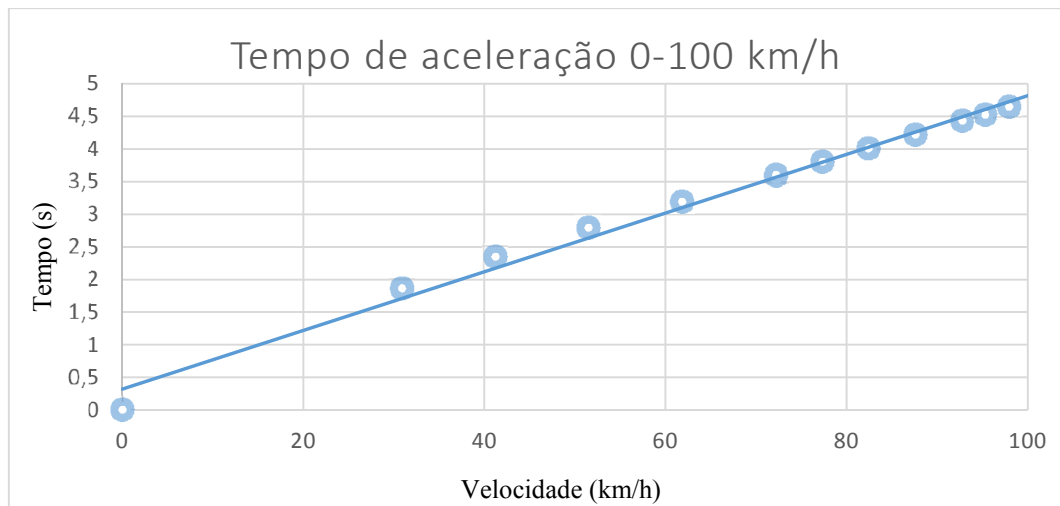


Gráfico 5 - Aceleração dos 0-100km/h do fórmula

Por este motivo foi feita uma aproximação à aceleração do 0-10 km/h, com um tempo de 0,9 segundos, sendo este valor uma aproximação.

As forças que se tem de considerar para o cálculo do binário de arranque são: a força resultante da aceleração do veículo, calculada a partir da segunda lei de Newton (F_m), a força de atrito com o solo, na qual iremos considerar como coeficiente de arrasto no alcatrão (crr) um valor de 0,02. Também se tem de ter em conta a força resultante da massa, da inclinação da estrada (F_i) e a resistência do ar (F_{ar}). Pode-se ver na figura 15 o diagrama de forças do fórmula e as suas expressões estão imediatamente abaixo.

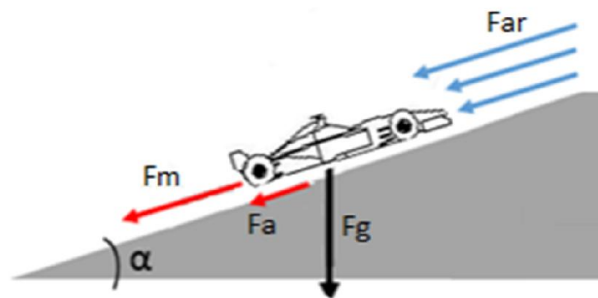


Figura 15 - Diagrama de forças aplicadas ao fórmula

$$a = \frac{v_f - v_i}{\Delta t} \quad 8$$

$$F_m = m \times a \quad 9$$

$$F_i = m \times g \times \sin \alpha \quad 10$$

$$F_a = Crr \times m \times g \times \cos \alpha \quad 11$$

$$F_{ar} = \frac{\rho \times Cx \times v^2}{2} \quad 12$$

Com as fórmulas acima descritas chegou-se aos valores de todas as forças, após isso foi feito o cálculo do somatório de todas elas. Com este valor e com o raio total da roda consegue-se o valor do binário à roda necessário para o arranque.

$$F_{total} = F_m + F_i + F_a + F_{ar} \quad 13$$

$$Bin_{roda} = F_{total} \times r_t \quad 14$$

Para fazer estes cálculos foram considerados os dados da tabela 8, de salientar que a massa de 460 kg, é a massa do conjunto veículo (395kg) mais piloto (65kg). Outro aspeto a ter em conta é o valor do coeficiente de resistência aerodinâmica (C_x) que foi atribuído como sendo de 0,42, valor igual ao do fórmula Ford, este valor foi assim atribuído devido a falta de informação tanto da área frontal como do coeficiente de arrasto (C_d), valores que dariam para calcular o C_x .

Tabela 8 - Dados gerais fórmula Glória B4

Dados:	
Massa [kg]	460,00
g [m/s ²]	9,81
C_x	0,42
C_{rr}	0,02
Inclinação [%]	5
Velocidade [km/h]	10,00
Velocidade [m/s]	2,78
Raio total [m]	0,273
Perímetro [m]	1,713
Razão de transmissão total 1ª velocidade	9,975

A partir das fórmulas e os dados anteriormente referidos, consegue-se obter os resultados da tabela 9.

Tabela 9 - Resultados das equações 8 até 14

Resultados:		
	F_m [N]	1420
	F_i [N]	225
	F_a [N]	68
	F_{ar} [N]	2
	a [m/s ²]	3,09
	F_{total} [N]	1715
Roda	Potência [kW]	4,76
	rpm	97,31
	Binário [Nm]	514,24

Concluído o cálculo do binário de arranque, chegou-se a um valor de 514,24 Nm para o binário a roda, este valor no caso de se ter razão de transmissão igual a da primeira velocidade, de 9,975, obriga a que o motor debite no mínimo um binário de 51,55 Nm. A folha de cálculo referente a todo este processo determinação do binário de arranque encontra-se descrita no anexo 2.

Capítulo 4 – Motor elétrico

Finalizada a análise do motor térmico e das suas relações de caixa, começa-se agora o estudo mais aprofundado do motor elétrico. Na escolha da melhor tecnologia elétrica para implementação, foi feita uma breve comparação entre vários tipos de motores, no anexo 3 podemos ver uma tabela que mostra as principais características de alguns motores. Após esta análise, foram escolhidos dois motores o *EMRAX 228* e o *Brusa ASM1-6.17.12*.

O motor *Brusa* tem 107 kW de potência máxima (cerca de 143 cv), e apresenta uma velocidade de rotação máxima de 11000 rpm, e um binário em contínuo de 100Nm e máximo de 275Nm. Estas características são as que mais se aproximam do motor Yamaha Fazer. Em contrapartida este motor necessita de 400V de tensão, um valor bastante elevado, e que traria dificuldades acrescidas na escolha das baterias.

O motor *EMRAX 228*, é um motor síncrono de ímanes permanentes sem escovas, foi esta a tecnologia escolhida para a construção do fórmula elétrico, e é a base de estudo desta dissertação. Este não apresenta características tão idênticas ao motor térmico, mas sendo uma tecnologia mais equilibrada torna-se vantajosa, e como já existe um motor destes na Faculdade de Engenharia torna mais simples o seu estudo e aplicação.

Entre os três motores *EMRAX 228* existentes, o que está a ser estudado é o *Medium Voltage* com refrigeração a água.

Na tabela 10, apresentada em seguida pode-se ver as principais características deste motor. De salientar que mesmo não tendo uma velocidade de rotação muito elevada, tem um binário e potência que são bastante interessantes, sendo mesmo o binário mais elevado que o do próprio motor térmico. Este motor tem uma particularidade, que é ter dois regimes de funcionamento, contínuo ou pico. Em regime de pico o motor só poderá ser utilizado durante alguns segundos, pois sobreaquece, mas é neste regime que apresenta a potência e binário máximo.

Tabela 10 - Dados gerais do motor EMRAX 228 [33]

EMRAX 228 Medium Voltage	
Refrigeração	Água
Massa [kg]	12,3
Diâmetro [mm]	228
Altura [mm]	86
Tensão nominal [V]	300
Potência máxima [kW]	100
Potência em contínuo [kW]	30-50 *
Rotação máxima [rpm]	4000
Corrente máxima [A]	320
Corrente em contínuo [A]	160
Binário máximo [Nm]	240
Binário em contínuo [Nm]	125
Temperatura máxima [°C]	120
Eficiência [%]	93-96

*(Depende do regime de rotação do motor)

A implementação deste motor no automóvel implica a sua ligação às rodas, para isso poder-se-ia utilizar uma das tipologias abordadas no capítulo 2. Entre as seis opções, escolheu-se a B, que tem a ligação feita por uma engrenagem fixa, mas com uma pequena derivação. Como o fórmula *Glória* B4 não tem diferencial de origem, a montagem do conjunto elétrico também não irá ter, fazendo uma ligação direta por corrente à cremalheira que está no eixo de transmissão.

Para o estudo da relação de caixa existente, tem de se ter em consideração as curvas de potência e binário do motor. No gráfico 6 pode ver-se as curvas de potência-binário, onde a vermelho se vê o regime de pico do motor e a verde o contínuo, o tipo de linha faz a distinção entre curva de potência (linha contínua) ou de binário (linha pontilhada).

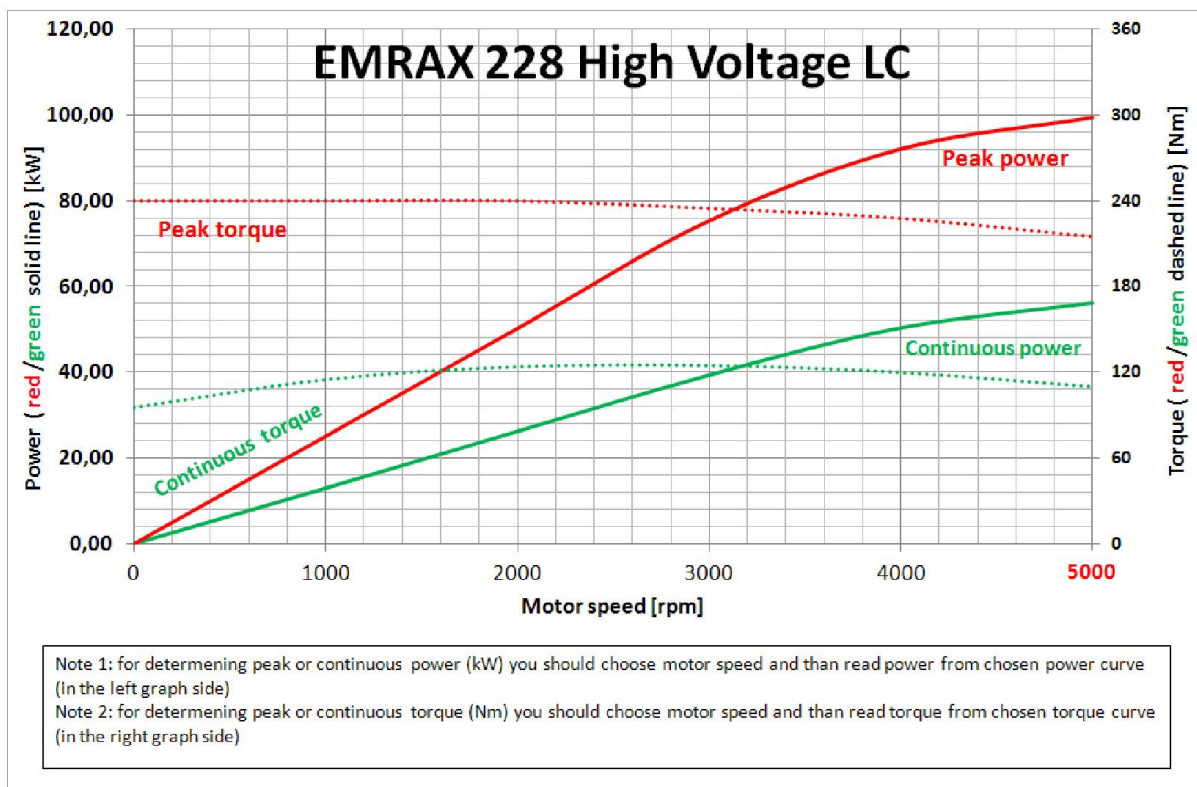


Gráfico 6 – Curvas de potência-binário do motor EMRAX 228[33]

A partir da análise das curvas foi possível fazer uma folha de cálculo, que se encontra no anexo 4, onde se pode ver para determinados regimes, de 200 rpm em 200 rpm, a evolução da potência e do binário à roda. Pode ver-se em seguida, na tabela 11, uma pequena parte dessa tabela total.

Deve salientar-se que o gráfico 6 que é apresentado é relativo ao motor *High Voltage LC*, mas por indicação do fabricante as curvas de potência-binário são muito idênticas ao *Medium Voltage*, por esse motivo a própria *Enstroj* não fornece os gráficos dos outros motores.

No desenvolvimento do sistema elétrico para o fórmula, tem de se ter em consideração, tal como já foi referido, os tipos de conversor, inversor e controlador que vão ser utilizados. No caso deste projeto existe uma limitação ao nível do controlador, pois este só consegue no máximo debitar 40 kW de potência. Assim sendo as curvas de binário e potência vão ser ligeiramente diferentes das de origem. Pela tabela 11 pode ver-se que o valor de potência é crescente até atingir o valor de 40 kW, a partir desse ponto torna-se constante. A evolução da potência segue a linha de *peak power*, até às 1600 rpm, a partir desse ponto torna-se paralela ao eixo das abcissas, tal como se pode ver no gráfico 7. Esta limitação de potência não é de todo desvantajosa, pois assim consegue-se que o motor não sofra um aumento de temperatura excessivo que limite o binário. Desta forma pode-se também utilizar desde o momento inicial o binário em *peak power*, de cerca de 240 Nm.

Tabela 11 - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para uma relação de caixa

Relação: 2,35	rpm	Bin (Nm)	Pot (kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	Bin roda (Nm)
Peak	200,00	240,00	5,06	85,11	2,43	539,37
	400,00	240,00	10,12	170,21	4,86	539,37
	600,00	240,00	15,18	255,32	7,29	539,37
	800,00	240,00	20,24	340,43	9,72	539,37
	1000,00	240,00	25,30	425,53	12,15	539,37
	1200,00	240,00	30,36	510,64	14,58	539,37
	1400,00	240,00	35,42	595,74	17,01	539,37
	1600,00	238,73	40,00	680,85	19,44	532,97
	1800,00	212,21	40,00	765,96	21,87	473,75
	2000,00	190,99	40,00	851,06	24,29	426,38
Contínuo	2200,00	173,62	40,00	936,17	26,72	387,61
	2400,00	159,15	40,00	1021,28	29,15	355,31
	2600,00	146,91	40,00	1106,38	31,58	327,98
	2800,00	136,42	40,00	1191,49	34,01	304,55
	3000,00	127,32	40,00	1276,60	36,44	284,25
	3200,00	119,37	40,00	1361,70	38,87	266,49
	3400,00	112,34	40,00	1446,81	41,30	250,81
	3600,00	106,10	40,00	1531,91	43,73	236,88
	3800,00	100,52	40,00	1617,02	46,16	224,41
	4000,00	95,49	40,00	1702,13	48,59	213,19

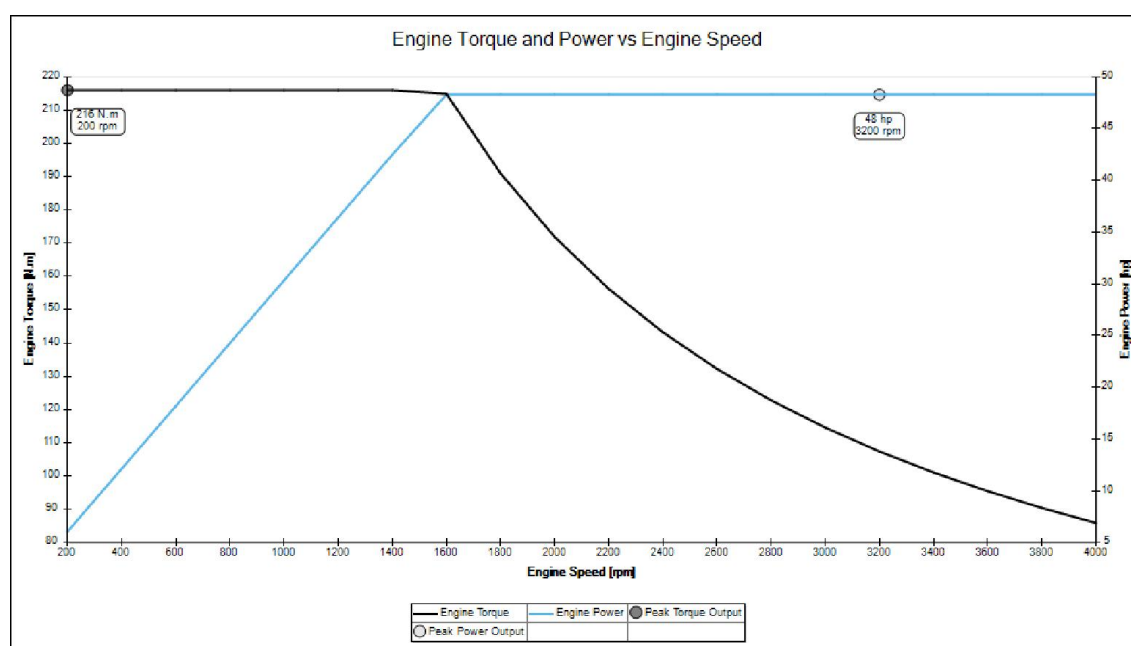


Gráfico 7 - Curva potência-binário da solução elétrica que foi instalado no fórmula – Potência (azul) e Binário (preto)

Pelo gráfico 7 constata-se que a potência máxima é de 48 cv, cerca de 35 kW, este valor não é os 40 kW que são referidos na tabela 11 pois o software *Optimum Lap* faz o cálculo da potência através do binário e rotação, dando sempre um valor errado por defeito.

Outro fator relevante na tabela 11 é a relação final, como já referido anteriormente o fórmula só terá uma redução de velocidade. Para o cálculo desta relação, teve de se ter em consideração o binário de arranque já calculado, pois este é o esforço máximo que vai ser imposto ao motor, este valor terá de ser, pelo menos igualado pelo binário à roda do motor elétrico.

O binário a roda é calculado a partir da potência, da velocidade, da relação final (i) e também do rendimento de transmissão. Neste caso o rendimento considerado é de 95%, um valor bastante superior ao do motor térmico, pois como só existe uma redução, já não se tem todas as perdas inerentes as passagens entre as várias mudanças. O valor da relação final foi determinado por iterações, foram sido testados vários valores para a redução, até se conseguir chegar a valor de 2,25, o que nos daria um resultado para o binário de arranque de 516,41 Nm. Mas como no cálculo da relação final tem de se ter em consideração, ou os diâmetros das rodas dentadas ou o número de dentes (z) das mesmas, teve de se alterar para 2,35 o valor da relação de transmissão, pois o número de dentes tem de ser inteiro, neste caso irá ter de se um $Z_{pinhão}$ igual a 17 dentes. Esta relação final pode ser alterada, caso se pretenda ter mais binário ou então mais velocidade de ponta, como se pode ver pela equação 15 quando o valor da redução aumenta o binário também segue mesmo crescimento, e inversamente a velocidade vai diminuir. A cremalheira que está acoplada ao eixo de transmissão esta preparada para ser mudada, neste momento a que esta a ser utilizada é a cremalheira com $Z_{cremalheira}$ igual a 40 dentes. As equações que nos permitem chegar aos resultados do binário à roda e da redução final são as seguintes:

$$Bin_{roda} = \frac{Pot (kW) \times 1000 \times 60}{rpm \times 2 \times \pi} \times i \times \eta_{transmissão} \quad 15$$

$$i = \frac{Z_{cremalheira}}{Z_{pinhão}} \quad 16$$

Sendo assim, com esta relação de transmissão obtém-se um valor de binário à roda de 539,37 Nm, e uma velocidade máxima de 172,94 km/h (48.59 m/s). Comparativamente aos dados do motor térmico, pode-se ver que tanto o binário como a velocidade máxima diminuíram, como era de esperar. Uma última comparação que pode ser feita com o motor térmico é o tempo de aceleração dos 0-100 km/h, no caso do motor a combustão demora cerca de 3,11 segundos, já no caso do motor elétrico este tempo aumenta para cerca de 6,6 segundos. Para retificar estes valores teria de ser introduzida uma caixa de velocidade.

4.1. Caixa de velocidades

Uma das formas de conseguir obter resultados mais idênticos com o motor elétrico e com o térmico seria utilizar uma pequena caixa de velocidades acoplada à saída do motor elétrico. Com apenas duas mudanças conseguiríamos atingir o binário e a velocidade máxima que o motor a combustão consegue. Este breve estudo foi realizado, mais uma vez pelo método iterativo, foram sendo testadas várias relações de caixa por forma a se conseguir atingir os valores pretendidos. Nas tabelas 12 e 13 pode-se ver, para as diferentes relações de caixa, o binário e a velocidade a roda.

Tabela 12 - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para a primeira relação caixa

Relação: 2,5	rpm	Bin (Nm)	Pot (kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	Bin roda (Nm)
Peak	200,00	240,00	5,06	80,00	2,28	573,79
	400,00	240,00	10,12	160,00	4,57	573,79
	600,00	240,00	15,18	240,00	6,85	573,79
	800,00	240,00	20,24	320,00	9,13	573,79
	1000,00	240,00	25,30	400,00	11,42	573,79
	1200,00	240,00	30,36	480,00	13,70	573,79
	1400,00	240,00	35,42	560,00	15,99	573,79
	1600,00	238,73	40,00	640,00	18,27	566,99
	1800,00	212,21	40,00	720,00	20,55	503,99
	2000,00	190,99	40,00	800,00	22,84	453,59
	2200,00	173,62	40,00	880,00	25,12	412,36
Contínuo	2400,00	159,15	40,00	960,00	27,40	377,99
	2600,00	146,91	40,00	1040,00	29,69	348,92
	2800,00	136,42	40,00	1120,00	31,97	323,99
	3000,00	127,32	40,00	1200,00	34,26	302,39
	3200,00	119,37	40,00	1280,00	36,54	283,49
	3400,00	112,34	40,00	1360,00	38,82	266,82
	3600,00	106,10	40,00	1440,00	41,11	252,00
	3800,00	100,52	40,00	1520,00	43,39	238,73
	4000,00	95,49	40,00	1600,00	45,67	226,80

Tabela 13 - - Folha de cálculo do binário e da velocidade à roda para a segunda relação de caixa

Relação: 1,65	rpm	Bin (Nm)	Pot (kW)	n _{final} [rpm]	v à roda [m/s]	Bin roda (Nm)
Peak	200,00	240,00	5,06	129,03	3,68	355,75
	400,00	240,00	10,12	258,06	7,37	355,75
	600,00	240,00	15,18	387,10	11,05	355,75
	800,00	240,00	20,24	516,13	14,73	355,75
	1000,00	240,00	25,30	645,16	18,42	355,75
	1200,00	240,00	30,36	774,19	22,10	355,75
	1400,00	240,00	35,42	903,23	25,78	355,75
	1600,00	238,73	40,00	1032,26	29,47	351,53
	1800,00	212,21	40,00	1161,29	33,15	312,47
	2000,00	190,99	40,00	1290,32	36,83	281,23
	2200,00	173,62	40,00	1419,35	40,52	255,66
Contínuo	2400,00	159,15	40,00	1548,39	44,20	234,36
	2600,00	146,91	40,00	1677,42	47,88	216,33
	2800,00	136,42	40,00	1806,45	51,57	200,88
	3000,00	127,32	40,00	1935,48	55,25	187,48
	3200,00	119,37	40,00	2064,52	58,93	175,77
	3400,00	112,34	40,00	2193,55	62,62	165,43
	3600,00	106,10	40,00	2322,58	66,30	156,24
	3800,00	100,52	40,00	2451,61	69,99	148,01
	4000,00	95,49	40,00	2580,65	73,67	140,61

Com a análise das – tabelas 12 e 13 pode-se verificar que com apenas duas mudanças se consegue ter praticamente o mesmo binário que o motor térmico às 3000 rpm. Como velocidade máxima temos agora 265,21 km/h (73,67 m/s).

A solução da caixa de velocidades seria a melhor solução de se ter os desempenhos desejados teoricamente, mas por motivos de dificuldade de montagem e de espaço disponível, não se optou pela montagem desta solução.

Num futuro estudo com base neste projeto poderá ser feito um aprofundamento desta matéria. Sendo com mais cuidado estudada as possíveis relações de caixa, podendo mesmo incluir mais mudanças. Deverá também ser feito um estudo sobre o desenho exterior da caixa pois o espaço disponível para o seu acoplamento é muito reduzido.

(Página em branco)

Capítulo 5 – Software Optimum Lap

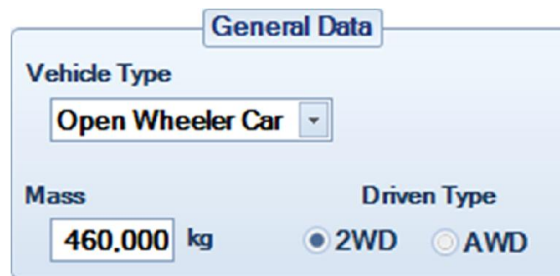
O software *Optimum Lap* é um produto desenvolvido pela empresa *Optimum G*, uma companhia especializada no desenvolvimento de ferramentas de simulação e análise de parâmetros relacionados com as performances automóveis.

Este programa permite simular a performance do veículo numa pista, para isso tem de se definir determinados parâmetros relacionados com a aerodinâmica, peso, tipo de pneus, as relações de caixa, a curva de binário e os rendimentos do motor e transmissão. Após a definição do carro, pode-se ajustar os parâmetros do circuito onde vai ser testado ao automóvel.

5.1. Simulação em Optimum Lap – Motor térmico

O primeiro parâmetro de configuração de um carro é a sua tipologia, figura 16, o *Optimum Lap* já tem definido vários tipos de veículos, tais como carro de rali, sport-protótipos, V8 Supercar, carro de estrada, entre outras. Como dados gerais tem ainda de se referir a massa e se a tração é integral ou apenas a duas rodas.

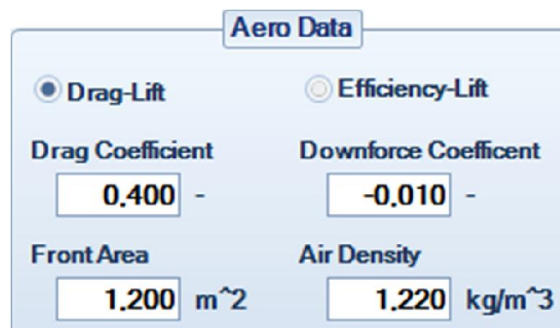
No caso deste projeto a tipologia do veículo é denominada de “*Open Wheeler Car*”, com tração a duas rodas. A massa da fórmula também é colocada deste primeiro quadro.



The screenshot shows the 'General Data' window. Under 'Vehicle Type', a dropdown menu is set to 'Open Wheeler Car'. Below this, 'Mass' is input as '460.000 kg'. To the right, 'Driven Type' has two radio buttons: '2WD' (selected) and 'AWD' (unselected).

Figura 16 - Definição do tipo de veículo e do peso - Optimum Lap

Como segundo parâmetro a definir tem-se a aerodinâmica, figura 17, neste caso não existem valores reais para o Fórmula Glória B4, por este motivo foi realizada uma aproximação, tal como tinha sido feita no capítulo 3, para os valores do coeficiente de arrasto e para a área frontal.



The screenshot shows the 'Aero Data' window. At the top, 'Drag-Lift' is selected with a radio button, while 'Efficiency-Lift' is unselected. Below, 'Drag Coefficient' is input as '0.400' and 'Downforce Coefficient' as '-0.010'. At the bottom, 'Front Area' is input as '1.200 m^2' and 'Air Density' as '1.220 kg/m^3'.

Figura 17 - Definição do coeficiente de arrasto, área frontal e densidade do ar - Optimum Lap

Como terceiro quadro de definições do veículo, figura 18, tem-se a configuração dos pneus. Aqui tem de ser introduzido o raio da roda, o valor de resistência ao rolamento e as

forças de atrito laterais e longitudinais. Estes três últimos dados também não estão tabelados para o fórmula *Glória*, por este motivo, utilizou-se mais uma vez os valores de referência do Fórmula Ford.

Tire Data	
Tire Radius	Rolling Resistance
0.273 m	0.030 -
Longitudinal Friction	Lateral Friction
1.307 -	1.286 -

Figura 18 - Definição das características dos pneus - Optimum Lap

Em seguida tem de se colocar numa tabela a os valores de binário para cada rotação, tal como a que está presente na figura 19. Foi definido o tipo de combustível do motor e a sua eficiência térmica. Após estes dados o programa já consegue desenhar a curva de binário do motor. Contudo ainda é necessário definir a curva de potência, para isso é necessário colocar no *software* às relações de caixa para cada mudança, e o respetivo rendimento de transmissão. Os últimos fatores a serem inseridos nos programa são o rendimento do motor, as perdas relativas ao escoamento do ar sobre a carroceria (aerodinâmica) e escorregamento dos pneus. Estes últimos servem para ajustar dos tempos de aceleração dos 0-100 km/h, dos tempos de travagem, e também dos tempos reais em pista, não são os resultados reais dos rendimentos e das perdas. Por esse motivo, como se pode ver na figura 18, temos 0% de perdas para a potência, para a aerodinâmica e para o escorregamento.

ENGINE DATA		TRANSMISSION DATA	
Add / Remove Torque Data		Transmission Type Sequential Gearbox	
<div> </div>		Add / Remove Gears <div> </div>	
Engine Speed (rpm)	Engine Torque (N.m)	Gear Ratios	
3000	66.00	Gear 1	3.9525
3500	90.00	Gear 2	2.9122
4000	93.00	Gear 3	2.3715
5000	104.00	Gear 4	2.1075
6000	108.00	Gear 5	1.8972
7000	103.00	Gear 6	1.7628
7500	103.00		
8000	101.00		
8500	100.00		
9000	100.00		
9250	98.00		
9500	98.00		
10000	96.00		
10250	96.00		
10500	94.00		
10750	90.00		
11000	87.00		
11500	81.00		
Thermal Efficiency (optional) 30.000 %		Final Drive Ratio 2.524 -	
Fuel Energy Density (optional) Gasoline 47200000 J/kg		Drive Efficiency 95.000 %	
SCALING FACTORS			
Power Factor 100.000 %		Aero Factor 100.000 %	
Grip Factor 100.000 %			

Figura 19 - Definição do binário, das relações de caixa e dos rendimentos - Optimum Lap

Após a definição de todos estes parâmetros no programa, este faz um pequeno relatório, que pode ser visto no anexo 5, onde estão desenhadas as curvas de binário e potência, o escalonamento das mudanças de caixa e um sumário das principais características do carro, tais como peso, velocidade máxima, binário máximo, tipo de combustível, *downforce*, entre outras.

Em seguida pode-se ver a curva de potência-binário, gráfico 8, desenhados pelo *software Optimum Lap*. Em comparação com o gráfico 4 do capítulo 3, pode concluir que a simulação se aproxima muito dos valores fornecidos pela empresa *Glória Cars*.

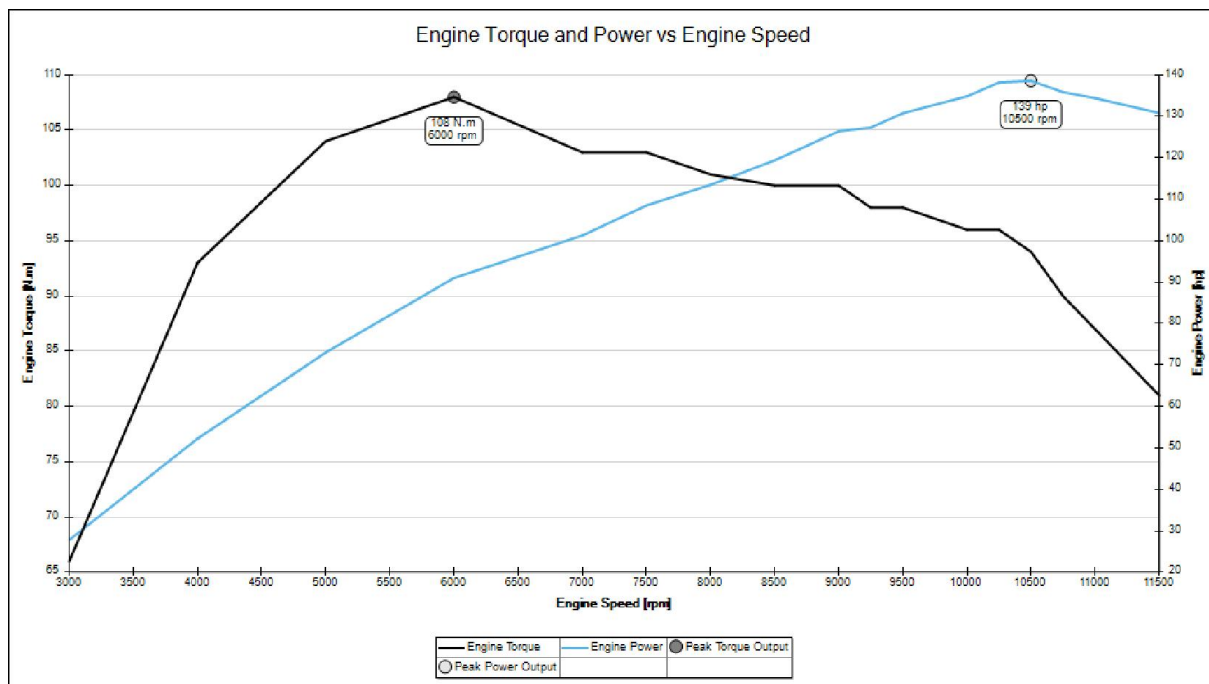


Gráfico 8 - Curvas de potência e binário desenhadas pelo software Optimum Lap – Potência (azul) e Binário (preto)

Em jeito de conclusão pode-se dizer que os resultados fornecidos pelo programa de simulação estão bastante próximos da realidade. Pode-se assim validar a utilização deste programa para a simulação do motor elétrico que vai ser utilizado.

5.1.1. Simulação em Pista – Motor térmico

Para se simular em pista no *software Optimum Lap*, é necessário criar o traçado da pista, ou então utilizar determinadas pistas já configuradas pela empresa *Optimum G*. No programa pode-se recriar uma pista exatamente como na realidade, desde os ângulos das curvas, a sua inclinação e o próprio declive.

No caso deste projeto optou-se por utilizar uma pista já existente na base de dados. O circuito selecionado foi o Autódromo do Estoril, figura 20, a escolha desta pista deveu-se a esta ter uma grande reta (cerca de 956 m), mas também as curvas bastante sinuosas e com travagens acentuadas, como por exemplo a curva 9.

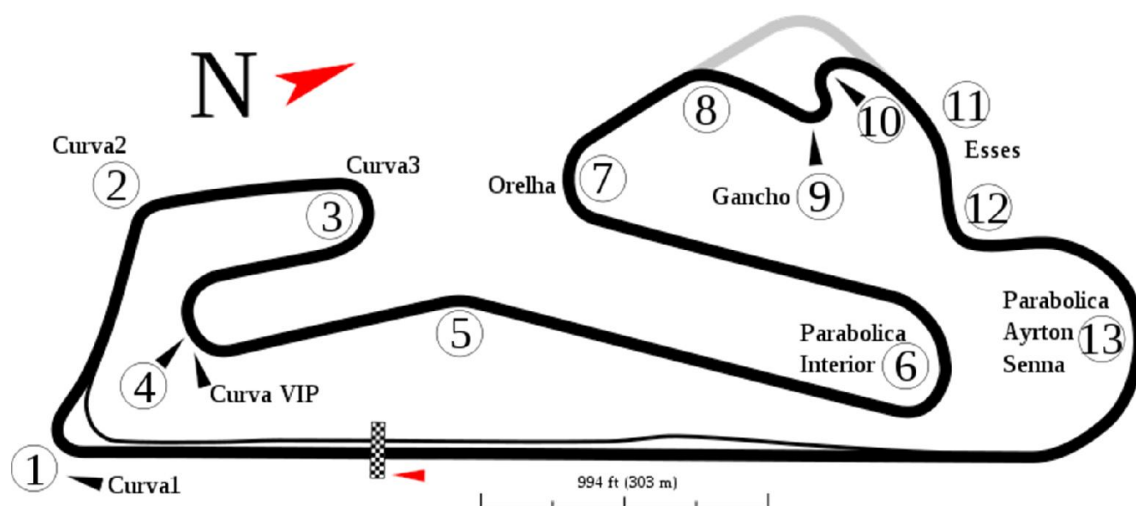


Figura 20 - Desenho da pista do Autódromo do Estoril [34]

Após se ter definido o carro e a pista pode-se passar para a simulação de uma volta ao circuito. Inicia-se o estudo com a simulação do fórmula *Glória* B4 com o motor térmico.

Vai ser analisado, para este veículo, determinados pontos que vão servir como comparação com o mesmo carro mas com o motor elétrico. Começa-se então o estudo por analisar a velocidade em todos os pontos do circuito, pode-se ver pela figura 21 que o carro atinge a velocidade máxima de 229 km/h, no final da reta da meta, e tem como velocidade mínima de 52 km/h, na curva 9.

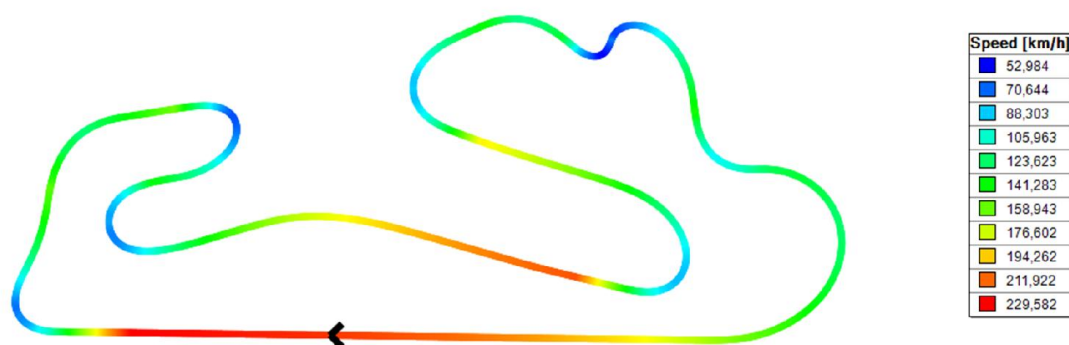


Figura 21 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula atinge no circuito do Estoril

Em seguida pode ver se o gráfico 9 que indica a velocidade do carro em cada ponto do circuito. Basicamente este gráfico é a transcrição da figura acima em valores numéricos mais precisos. Neste gráfico pode observar-se as fortes acelerações a que o veículo está sujeito, por exemplo a passagem pelos 2000 metros, num curto espaço de 400 metros o carro passa de 90 km/h para 190 km/h. De salientar que este gráfico começa nos 0 metros que é a zona onde se encontra a seta na figura 20.

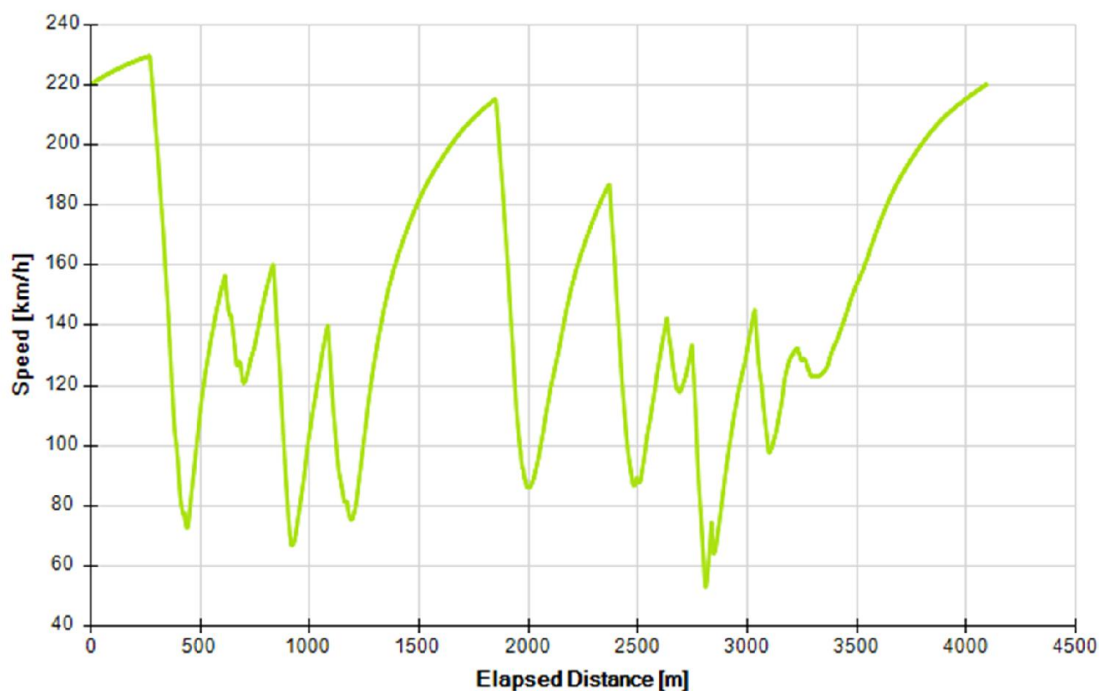


Gráfico 9 - Zona da pista onde o fórmula desacelera e acelera

Outro estudo que foi realizado foi sobre a utilização das várias mudanças no circuito. Pode-se ver pela figura 22 que o carro apenas utiliza cinco das seis mudanças, daí se pode retirar que a caixa de velocidade que equipa o fórmula não é a mais adequada para este circuito. Outro fator que tem de se ter em consideração é a utilização sistemática da 1ª velocidade, em condução normal em pista raramente se utilizaria a 1ª mudança, logo pode-se concluir que o escalonamento das mudanças não é o mais correto.

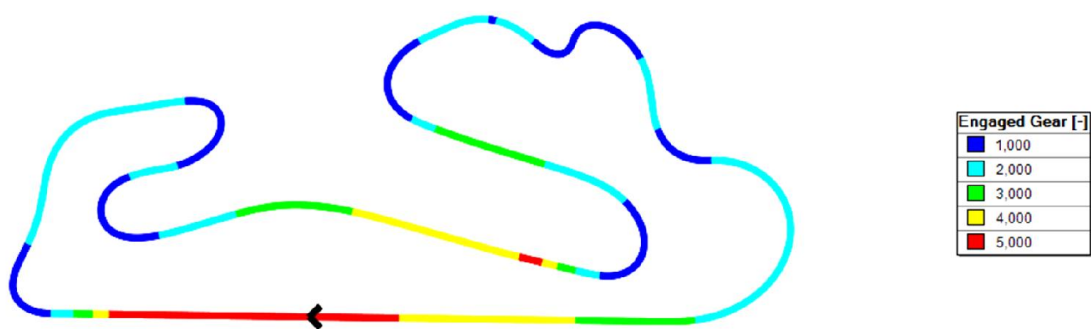


Figura 22 - Mudança usada em cada zona da pista

A caixa de velocidades que é utilizada pela empresa *Glória Cars*, na construção deste monolugar é a da moto Yamaha Fazer 1000, para a qual as relações de caixa estão otimizadas. Pela análise do gráfico 10 pode-se confirmar que a 6ª mudança não atinge velocidade de rotação superior a 5°, esta só existe para reduzir consumos, colocando uma relação de caixa que diminua a rotação do motor em velocidades elevadas.

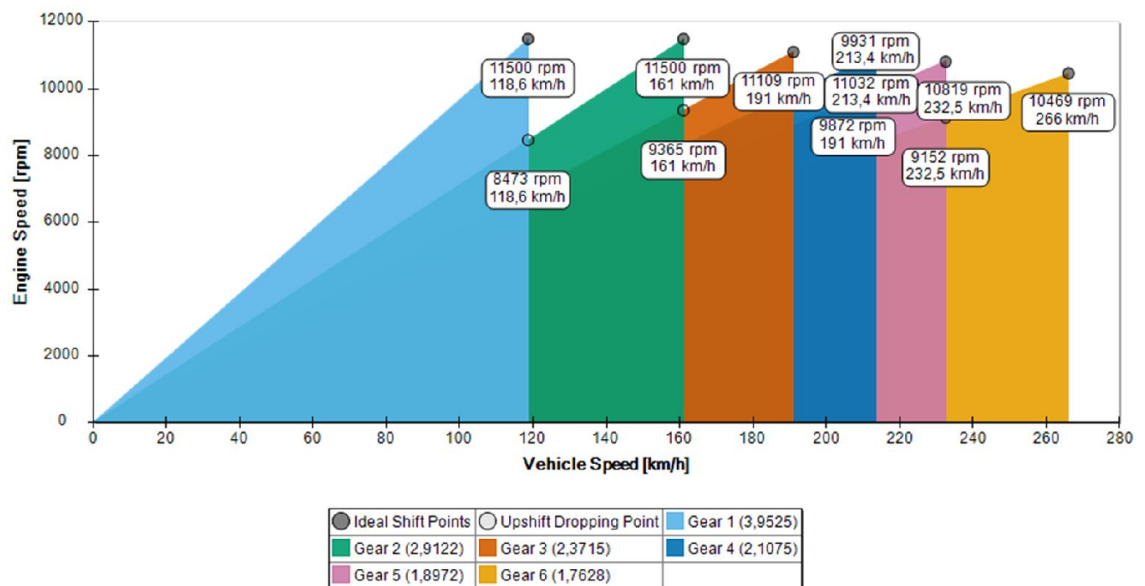


Gráfico 10 - Escalonamento das mudanças

Em última análise vai se ver a tabela de resultados por volta, que pode ser consultada no anexo 6, onde se retira o tempo por volta, de 110,32 segundos, isto é 1:50:320. Para que o carro complete uma volta tem de gastar 5672,30 kJ de energia, ou seja 0,40kg de combustível, este valor é importante uma vez que vai servir de comparação com os consumos energéticos do motor elétrico.

5.2. Simulação em Optimum Lap – Motor elétrico

Após a validação do *software*, passa-se a definição do fórmula, mas agora com o motor elétrico. De referir que os primeiros três quadros e o último, de definição dos rendimentos e perdas, não vão necessitar de alteração, pois só um daqueles fatores poderia ser alterado com a conversão do automóvel, que seria o peso. Mas como o conjunto do motor mais as baterias e mais os outros componentes, tais como controlador, inversor e conversor, pesam sensivelmente o mesmo que o motor térmico mais a caixa de velocidades e depósito de combustível, o valor do peso mantém-se constante (460kg).

As secções de *Engine Data* e *Transmission Data*, figura 23, são as que vão alteradas de acordo com os dados do capítulo 4, passado assim a ter diferentes curvas de potência-binário e novos dados relativamente a aceleração e ao escalonamento da caixa, que neste caso nem sequer existe, pois só há uma relação de caixa. Vemos em seguida os quadros com as alterações realizadas, de salientar a eficiência térmica do motor que passa de 30% para 90%.

ENGINE DATA

Add / Remove Torque Data

Engine Speed (rpm)	Engine Torque (N.m)
200	240,00
400	240,00
600	240,00
800	240,00
1000	240,00
1200	240,00
1400	240,00
1600	238,73
1800	212,21
2000	190,99
2200	173,62
2400	159,15
2600	146,91
2800	136,42
3000	127,32
3200	119,37
3400	112,34
3600	106,10
3800	100,52
4000	95,49

Thermal Efficiency (optional)

90,000 %

Fuel Energy Density (optional)

Lithium 1300000 J/kg

TRANSMISSION DATA

Transmission Type

Sequential Gearbox

Add / Remove Gears

	Gear Ratios
▸ Gear 1	2,3500

Final Drive Ratio

1,000 -

Drive Efficiency

95,000 %

Figura 23 - Definição do binário e das relações de caixa - Optimum Lap

Após realizar estas alterações irá-se obter as curvas de potência e binário do motor elétrico, gráfico 11, neste caso não se pode fazer uma comparação direta com as curvas fornecidas pela empresa *Enstroj*, pois estes apresentam duas curvas, uma referente ao *peak power* e outra ao *continuous power*. No caso em estudo, e como referido anteriormente, está a ser estudada uma análise mista das duas curvas. Obtendo-se assim as curvas representadas em seguida:

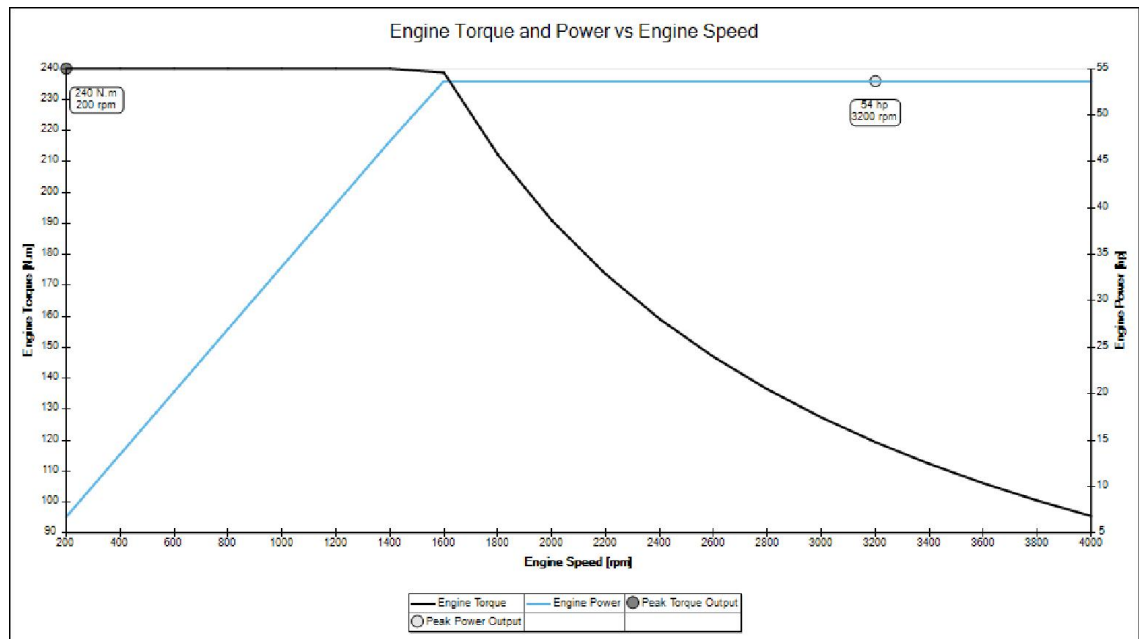


Gráfico 11 - Curva potência-binário da solução elétrica que foi instalado no fórmula – Potência (azul) e Binário (preto)

Pela análise do relatório gerado pelo programa, como se pode conferir no anexo 7, referente às características do automóvel, tais como aceleração dos 0-100 km/h, velocidade e binário máximo, entre outros parâmetros. Pode-se então confirmar que os cálculos teóricos feitos para o motor elétrico se aproximam da simulação.

5.2.1. Simulação em Pista – Motor Elétrico

Com base na simulação realizada para o motor térmico, foi feita uma idêntica para o motor elétrico. Neste caso mudou-se todos os parâmetros de definição do automóvel e voltou-se a simular, para a mesma pista, os mesmos dados que anteriormente foram simulados.

Deste modo, começa-se por simular a velocidade em cada ponto do circuito, como se pode confirmar pela figura 24 que a velocidade máxima registada é de 167 km/h, bastante inferior a registada pelo motor térmico, quanto a velocidade mínima já se obtém a mesma quer para um motor que para o outro, de 52km/h.

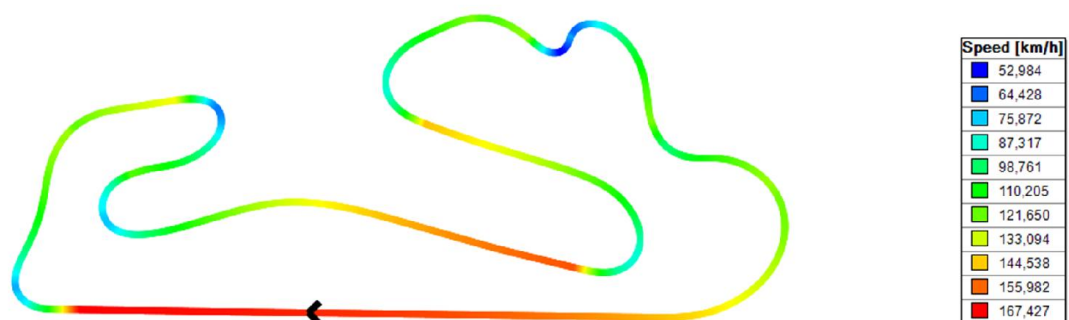


Figura 24 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 40 kW atinge no circuito do Estoril

A nível de aceleração o motor elétrico também não consegue registar valores idênticos aos do motor a combustão. No gráfico 12, pode-se visualizar uma comparação entre os dois motores, onde se consegue ver que a velocidade registada é muito diferente, isto é realçado pelo declive das retas, quando o carro está em aumento de velocidade, pode constatar-se que a aceleração do carro também apresenta valores inferiores.

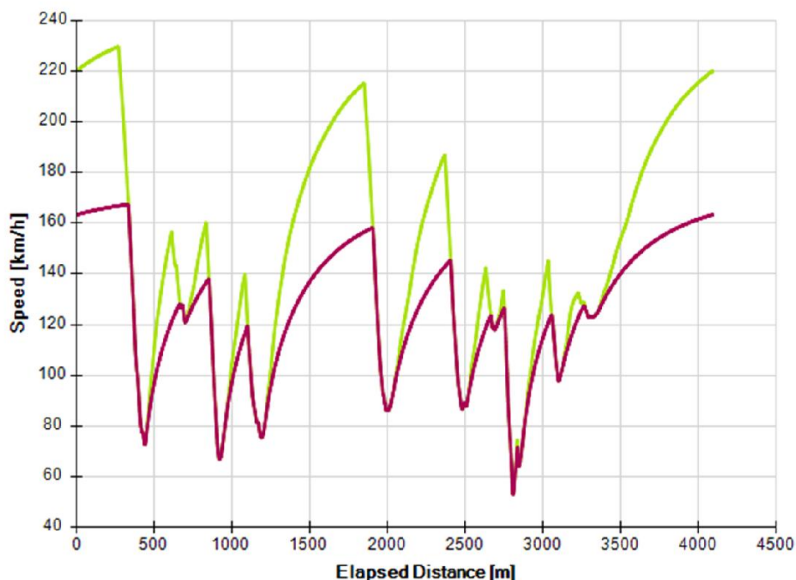


Gráfico 12 - Comparação entre as zonas da pista onde o fórmula a combustão (verde) e elétrico (bordô) desaceleram e aceleram

Como o fórmula *Glória* convertido não apresenta caixa de velocidades, não faz sentido fazer a análise das mudanças utilizadas ao longo do circuito. Por outro lado, pode fazer-se uma análise a rotação do motor. Pelo gráfico 13 constata-se que o motor térmico trabalha em média na gama das 8500 rpm, enquanto o elétrico funciona na gama das 2800 rpm. Outra análise que pode ser feita é a estabilidade na aceleração, ao se ter só uma mudança obtêm-se curvas de aumento de rotação muito longas, por exemplo entre os 1200 metros e os 2000 metros o motor térmico troca de caixa 4 vezes para aumentar a velocidade, até aos 1800 metros, e passa novamente da quinta mudança para primeira em 200 metros apenas. Estas constantes trocas de caixa levam a que existam perdas de tempo significativas, dependentes de piloto para piloto. Neste caso, em comparação com o motor elétrico, este ganha um pouco de tempo, pois não tem de executar trocas de mudança.

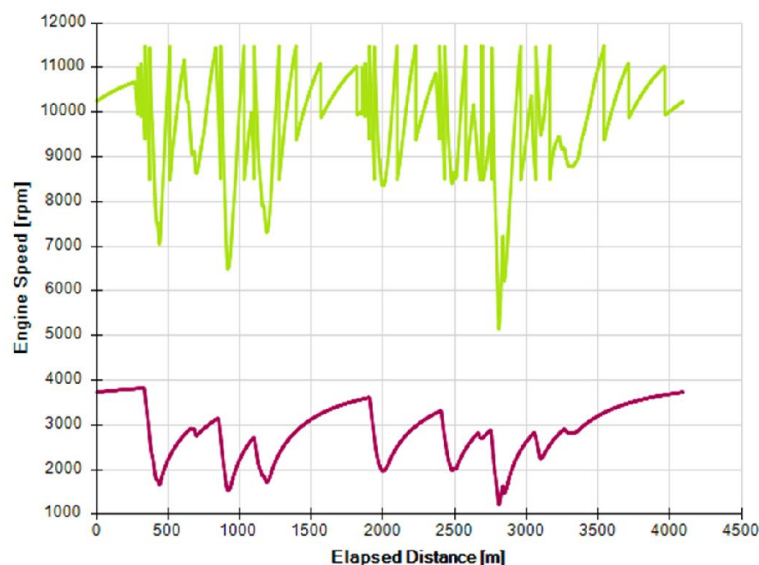


Gráfico 13 - Variação da rotação do motor em função da zona da pista – motor térmico (verde) e motor elétrico (bordô)

Como último ponto a ser alvo de análise, tem-se o tempo que o fórmula elétrico demora a percorrer a pista do Estoril em 123,41 segundos, isto é 2:03:410. Comparando os dois motores, tem-se apenas uma perda de 13 segundos. Quanto a energia despendida numa volta consegue-se ver que se gastou menos 2295,05 kJ, tendo sido gasto um total de 3377,25 kJ. Este valor vai ser muito importante para o cálculo das baterias. No anexo 8 pode visualizar-se uma tabela com todos os resultados por volta do motor elétrico.

Concluindo o estudo de simulação computadorizada do comportamento das duas motorizações, deve salientar-se que o veículo automóvel elétrico é ligeiramente mais lento, atingindo uma velocidade máxima de 60 km/h mais baixa que o motor térmico, a nível de aceleração o motor elétrico também perde relativamente ao à combustão, não desenvolvendo tão rapidamente. Uma justificação para este comportamento mais negativo é a utilização de uma só relação de caixa, que se faz notar mais quando o motor eletrico passa a ter uma potencia disponível maior, tal como se pode ver no subcapítulo seguinte.

5.2.2.Simulação em Pista – Motor Elétrico limitado a 70 kW

Por forma a mostrar que a limitação de caixa é uma das duas grandes limitações deste projeto, procedeu-se a alteração da limitação de potência por parte do controlador, passou-se de 40 kW para 70 kW disponíveis, esta alteração é apenas uma demonstração não irá ser aplicada ao projeto.

Com esta nova potência voltou a simular-se o comportamento do automóvel em pista. Obtendo os seguintes resultados que também podem ser vizualizados na figura 25.

- Velocidade máxima: 175 km/h
- Velocidade mínima: 53 km/h
- Velocidade média: 137 km/h
- Tempo por volta: 1:56.040

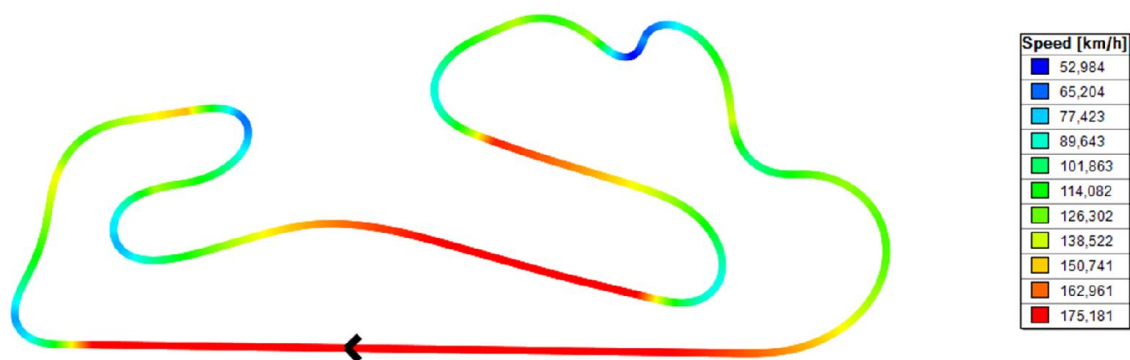


Figura 25 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW atinge no circuito do Estoril

Com o esquema acima representado consegue-se observar que existem várias zonas da pista onde a velocidade máxima, de 175 km/h, foi atingida, assim sendo pode comprovar-se que a relação de caixa de 2,35 é uma grande limitação a este projeto.

Fazendo uma análise grafica comparativa entre as três soluções, tal como a que se pode observar no gráfico 14, pode constatar-se que a passagem dos 40 kW (roxo) para os 70 kW (castanho) faz com que a curva de aceleração se aproxime da curva do motor térmico (verde). Outro ponto importante deste gráfico são os patamares horizontais da curva do motor limitado a 70 kW, estes patamares aparecem pois o motor já está no limite de velocidade que a relação de caixa impõe.

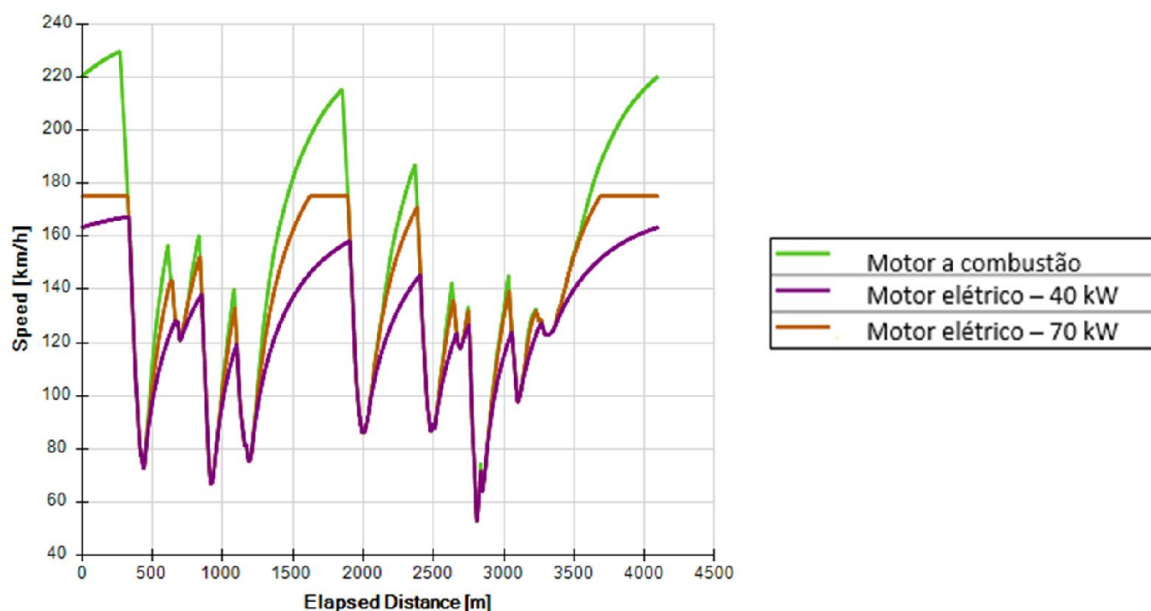


Gráfico 14 - Comparação das curvas de aceleração entre as 3 soluções

Para se poder chegar a um valor optimo de relação de caixa foram realizadas mais algumas simulações, de seguida pode observar-se duas das simulações que foram feitas com os respetivos resultados.

Na figura 26 pode visualizar-se a simulação para uma relação de caixa de 2, e na figura 27 para uma relação de caixa de 1,8.

- Velocidade máxima: 203 km/h
- Velocidade mínima: 53 km/h
- Velocidade média: 139 km/h
- Tempo por volta: 1:55.880
- Relação de caixa: 2

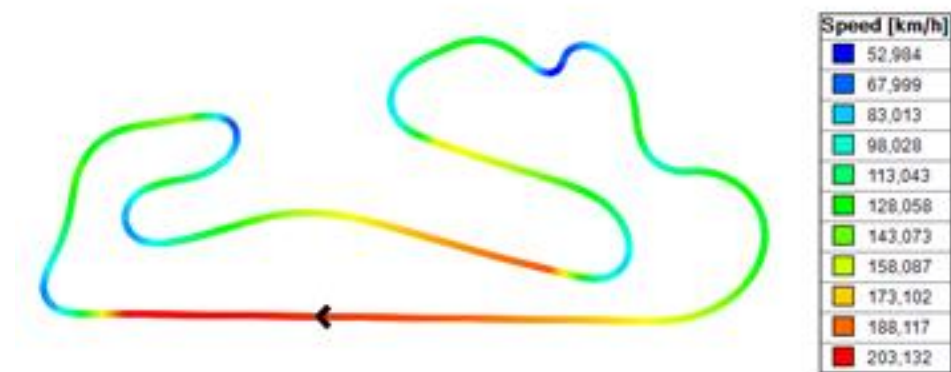


Figura 26 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW – relação de caixa: 2

- Velocidade máxima: 202 km/h
- Velocidade mínima: 53 km/h
- Velocidade média: 136 km/h
- Tempo por volta: 1:57.380
- Relação de caixa: 1,8

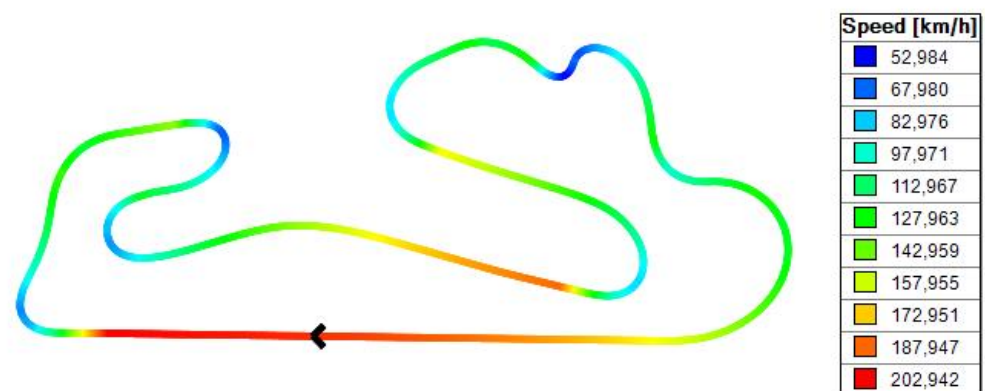


Figura 27 - Esquema das diferentes velocidades que o fórmula elétrico limitado a 70 kW – relação de caixa: 1,8

Após a conclusão destas duas simulações, conclui-se que quando a diminuição da relação de caixa não faz com que a velocidade aumente sempre e o tempo diminua, existe uma relação de caixa ótima, que nos dá o melhor tempo em pista e ao mesmo tempo a melhor velocidade. Para isso foram também testadas as relações de caixa 1,4 e 2,5, para que se pudesse

traçar uma curva que sirva para determinar a relação de caixa ideal. Essa curva pode ser observada pelo gráfico 15.

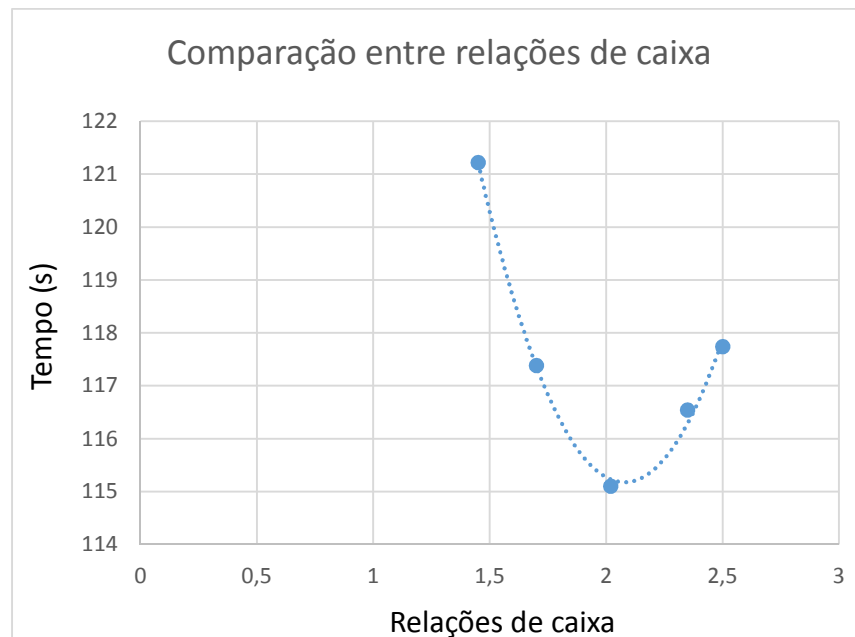


Gráfico 15 - Curva de determinação da relação de caixa ideal

Da análise deste gráfico pode concluir-se que a melhor relação de caixa é a relação de 2, é a que nos fornece melhor tempo em pista, e pelo análise dos esquemas de velocidades em pista para as diferentes simulações, esta relação é a que obteve melhor velocidade de ponta.

Capítulo 6 – Baterias

A escolha do tipo de baterias a utilizar na conversão do fórmula *Glória*, recaiu sobre as de Lítio – Polímero, esta seleção foi feita pois este tipo de tecnologia já se encontra em estudo no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Começa-se este capítulo com uma breve introdução a este tipo de baterias e às características de cada célula que vão compor os vários packs.

6.1. Baterias de Lítio - Polímero

A partir da evolução das baterias de íões de lítio convencionais, foram criadas as baterias de íão-lítio de polímero, também denominadas de “Lítio-Polímero”. Este tipo de baterias são recarregáveis e distinguem-se das suas antecessoras pelo facto que o seu eletrólito de sais de lítio não ser retido por um solvente orgânica, mas sim por um material compósito de polímero, tal como o óxido de polietileno e o poliacrilonitrilo.

Esta tecnologia é mais vantajosa que a convencional, pois apresenta um custo de produção mais baixo, maior robustez e a grande adaptabilidade a diferentes formatos, por esse motivo estas baterias também são usualmente descritas como células de bolsa.

Esta tecnologia de células de bolsa vem substituir as células cilíndricas, estas possuem uma grelha metálica rígida. Esta estrutura comprime os elétrodos e o separador uns contra os outros, criando uma forma compacta para a bateria. Já nas células de bolsa não há necessidade de pressão suplementar nas paredes da bateria, pois as várias folhas de componentes estão laminadas umas contra as outras, como se pode ver na figura 28.

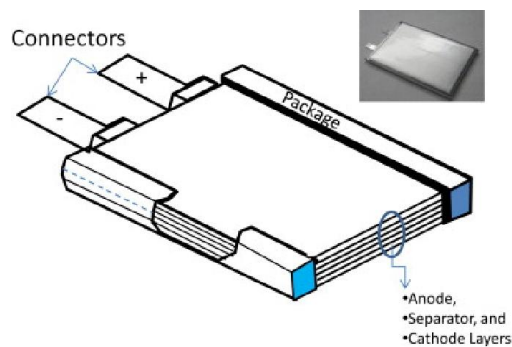


Figura 28 - Vista de corte de uma célula de bateria [30]

Outra vantagem de não possuírem estrutura metálica é o peso, que é reduzido em cerca de 20%. Uma desvantagem de não terem um invólucro rígido é a tendência que este tipo de baterias tem de dilatar com o excesso de carga.

Inicialmente esta tecnologia apresentava vários problemas de resistência interna, tinham tempo de carga mais longos e também taxas de descarga máxima mais lentas. Porém com o seu desenvolvimento, conseguiu-se aumentar as correntes de descarga máxima de 2 para 15 ou 30 vezes a capacidade da bateria. Contudo esta tecnologia ainda apresenta maior taxa de degradação que as convencionais baterias de íões de lítio.

A tensão mínima e máxima das baterias de lítio-polímero varia entre 2,7V (descarregada) e os 4,23V (totalmente carregada). Por segurança nunca se deverá utilizar este tipo de baterias quando a tensão destas está a abaixo dos 3V, pois corre-se o risco de incêndio ou explosão das baterias. Adaptado de [25]

Na figura 29 pode visualizar-se o aspecto de uma célula de bateris de lítio-polímero.



Figura 29 - Célula de bateria igual a utilizada neste projeto [30]

As baterias que foram utilizadas neste projeto são da empresa *General Electronics Battery Co.*, são de lítio-polímero e apresentam as especificações que se podem ver na tabela 14.

Tabela 14 - Características de uma célula de bateria [35]

Número do modelo	GEB - 10059156sh5c
Marca	GEB
Tipo de bateria	Polímero
Tamanho:	
Altura (mm)	158
Largura (mm)	59
Espessura (mm)	10
Volume (mm ³)	93220
Temperatura do funcionamento (°C)	- 20 a 60
Massa (g)	201,5
Tensão nominal (V)	3,7
Tensão máxima (V)	4,20
Capacidade nominal (Ah)	10
Discharge Rate (C)	5

Tal como referido no capítulo do estado de arte (2º Capítulo), as baterias necessitam de um balanceamento para controlar o nível de descarga, e também a temperatura de cada uma

delas. Como se vai poder verificar no subcapítulo seguinte, vai-se ter um pack de baterias com 72 células, deste modo com um número tão elevado de baterias o controlo de descarga tem de ser feito de uma forma minuciosa.

6.2. Dimensionamento das baterias

Para o dimensionamento do número de baterias tem de se estipular em primeiro lugar o tempo que o veículo vai ter de funcionar. Foi arbitrado que o carro elétrico teria uma autonomia de 15 min (900 segundos), à potência máxima. Com este valor escolhido e com a análise que foi feita à simulação em *Optimum Lap*, consegue-se chegar a energia total necessária.

Da simulação conseguiu-se tirar os valores do tempo por volta, 123,41 segundos, e do da energia gasta numa volta, 3377,25 kJ. Sabendo que os valores dados pelo *software* de simulação são para a situação em que o veículo percorre a pista na volta mais rápida, logo mais dispendiosa a nível energético, consegue-se calcular, com um grau de certeza elevado, o valor da energia total. A tabela 15 apresentada de seguida contém os resultados do cálculo da energia, e as considerações que foram feitas, tais como os rendimentos (η) e o fator de segurança (n). Foram também consideradas as seguintes equações:

$$n^{\circ} \text{ de voltas (real)} = \frac{\text{tempo previsto de andamento (s)}}{\text{tempo por volta (s)}} \quad 17$$

$$\text{Energia}_{\text{total s/perdas}} \text{ (kJ)} = \left(n^{\circ} \text{ de voltas}_{\text{aprox.}} \times \text{Energia}_{\text{por volta}} \text{ (kJ)} \right) \times n \quad 18$$

$$\eta_{\text{total}} (\%) = \eta_{\text{transmissão}} (\%) \times \eta_{\text{motor}} (\%) \times \eta_{\text{conversor}} (\%) \quad 19$$

$$\text{Energia}_{\text{total c/perdas}} \text{ (kWh)} = \text{Energia (kJ)} \times 0,00028 \quad 20$$

$$\text{Capacidade (Ah)} = \frac{\text{Energia (kWh)} \times 1000}{\text{Tensão (V)}} \quad 21$$

Tabela 15 - Resultados das equações 18 até 22

Cálculo da Energia necessária	
Energia por volta (kJ)	3377,25
Tempo por volta (s)	123,41
Tempo previsto de andamento (min)	15
Tempo previsto de andamento (s)	900
Número de voltas (real)	7,29
Número de voltas (aproximado)	7
Fator de segurança (n)	10%
Energia total sem perdas (kJ)	26004,83
Rendimento de transmissão ($\eta_{transmissão}$)	95,00%
Rendimento do motor (η_{motor})	90,00%
Rendimento do conversor ($\eta_{conversor}$)	90,00%
Rendimento total (η_{total})	76,95%
Energia total após perdas (kJ)	31998,94
Energia total após perdas (kWh)	8,96
Tensão nominal (V)	300
Capacidade (Ah)	29,87

Da tabela acima deve referir-se que para além do fator de segurança de 10%, já se tinha um fator de segurança de aproximadamente 5% proveniente da aproximação do número de voltas.

Após realizar-se esta primeira análise, onde se pode ver que é necessário ter 30 Ah de capacidade, e com os dados do 4º capítulo, que nos indicam que é preciso ter 300V para alimentar o motor, consegue-se então projetar os packs de baterias para o fórmula.

Deste modo construiu-se uma caixa, com dimensões restringidas pelo espaço disponível no fórmula, que tenha 100V de tensão nominal e 150A de corrente. Neste caso são necessários 3 packs para se conseguir ter os 300V exigidos pelo motor.

Para se conseguir as características acima referidas, cada pack tem de conter 72 células, e a distribuição das baterias tem de ser feita com dois propósitos muito importantes, têm de ao mesmo tempo ser fáceis de montar as ligações elétricas, pois vai ter de se agrupar células em paralelo e em série, por forma a se conseguir aumentar a corrente e a tensão, e também têm que ter uma boa refrigeração. Por estes motivos as células foram distribuídas por cada pack da seguinte forma, que se pode observar na figura 30.

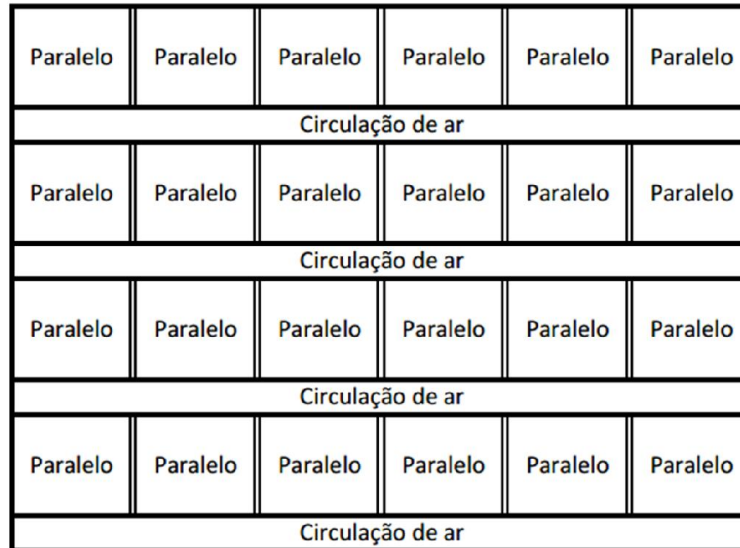


Figura 30 - Esquema de montagem das baterias num pack

Do esquema acima demonstrado consegue-se ver-se que existem 24 grupos com 3 células em paralelo cada um, daí obtém-se 30 Ah de capacidade, logo 150A, e ligando estes grupos em série vamos ter os 100V de tensão. Pode ver-se também que existem canais por onde circula ar que vai ajudar ao arrefecimento das baterias.

Após a seleção do tipo de packs apresenta-se de seguida os cálculos de potência para cada um deles, e também para o conjunto final que foi instalado no carro. Nas tabelas 16 e 17 estão os resultados dos cálculos para um pack de baterias e também para o conjunto dos três packs.

$$Potência (W) = Corrente (A) \times Tensão (V) \quad 22$$

$$Capacidade_{total} (Ah) = Capacidade_{nominal} (Ah) \times n^{\circ} baterias_{paralelo} \quad 23$$

$$Corrente (A) = Capacidade_{total} (Ah) \times Discharge Rate (C) \quad 24$$

$$Peso_{total} (kg) = Peso_{célula} (g) \times 10^{-3} \times n^{\circ} baterias \quad 25$$

$$Densidade\ energética\ (Wh/kg) = \frac{Energia(kWh) \times 10^3}{Peso_{total}} \quad 26$$

$$Energia(kWh) = \frac{Tensão (V) \times Capacidade_{nominal} (Ah) \times n^{\circ} de packs}{1000} \quad 27$$

Tabela 16 - Dimensionamento de um pack de baterias

Número de packs	1
Número de baterias	72
Tensão (V)	100
Capacidade nominal de uma célula (Ah)	10
Número de baterias paralelo	3
Capacidade total (Ah)	30
Discharge Rate (C)	5
Corrente (A)	150
Potência (kW)	15
Peso por célula (g)	201,5
Peso total (kg)	14,51

Tabela 17 - Dimensionamento do conjunto de três packs de baterias

Número de packs	3
Número de baterias	216
Tensão (V)	300
Capacidade total (Ah)	30
Energia (kWh)	9
Corrente (A)	150
Potência (kW)	45
Peso total (kg)	43,52
Densidade energética (Wh/kg)	206,78

Através da tabela 17 pode-se concluir que para além da limitação do controlador a 40 kW de potência, tem-se também uma limitação imposta pelas baterias, neste caso tem-se um limite um pouco superior a 45 kW, que não serão sempre debitados pelas baterias pois tensão que vai sendo debitada pelas células vai baixando ligeiramente ao longo da sua utilização, deste modo a limitação do controlador não se trona um transtorno a construção do fórmula elétrico.

Com estes cálculos consegue também perceber-se que o conjunto total de baterias terá uma densidade energética elevada, o que mostra que este tipo de baterias de lítio-polímero são adequadas ao projeto em questão.

Capítulo 7 – Modelação do sistema powertrain

Neste capítulo vai ser abordada a modelação e o cálculo pelo método de elementos finitos das peças necessárias a montagem de um veículo elétrico, vai também ser referenciado os processos de fabrico e o material em que cada peça vai ser realizada. Teve de se ter em consideração as dimensões do fórmula, do motor elétrico, dos controladores e também das baterias. Para se fazer esta modelação das peças foram utilizados os *softwares Solidworks* e *Autocad*.

No anexo 9 encontram-se todos os desenhos definição das peças referidas nesta secção.

7.1. Modelação das peças para o motor e controlador

Na modelação das peças de ligação ao motor tem de se ter em consideração as dimensões reais do motor. Para isso foi feito o estudo do desenho 2D do motor *Emrax 228*, que se pode ver na figura 31, a partir deste desenho e da medição das dimensões reais do motor realizou-se a modelação 3D do motor, por forma a conseguir-se modelar o resto das peças que iram ser documentadas em seguida.

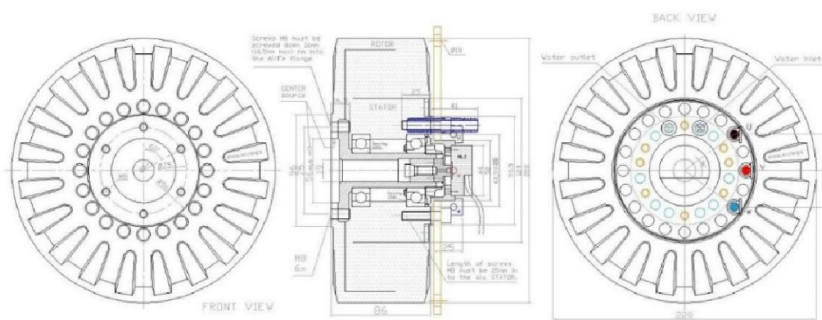


Figura 31 - Dimensões do motor Emrax 228 [1]

Na figura 32 pode-se observar o desenho tridimensional do motor, onde podemos ver a zona dos terminais elétricos, com as respetivas cores e também a zona de entrada de água para refrigeração, pintada de bronze.



Figura 32 - Desenho 3D do motor elétrico

7.1.1. Suporte do Resolver

De seguida foi feita a peça de suporte para o resolver. O resolver é um leitor de posição relativa do motor, com este dispositivo consegue-se a partir de cálculos feitos pelo controlador obter a velocidade de rotação do motor e posição do mesmo, sendo que esta medida é muito importante no correto funcionamento do mesmo, dando o sentido de rotação do motor.

Nesta peça de suporte teve de se ter em especial atenção à zona de entrada e saída de água, a posição dos parafusos de fixação e também da forma que está vai ser acoplada. Deste modo optou-se por fixar a peça na furação M8 existente no motor, sendo que só dois dos parafusos fazem o aperto do suporte ao motor quando o apoio não está montado, pois os restantes cinco furos vão ser passantes, permitindo a ligação do apoio ao motor.

Outras características importantes nesta peça são:

- O rasgo feito na parte contrária à zona de fixação, que vai servir para passagem dos fios do resolver;
- Os três furos que servem de posicionamento do resolver;
- A zona de apoio do rolamento, que vai servir de suporte e guiamento do veio que liga a saída de potência do motor ao resolver.

Todas estas características podem ser vistas na figura 33.

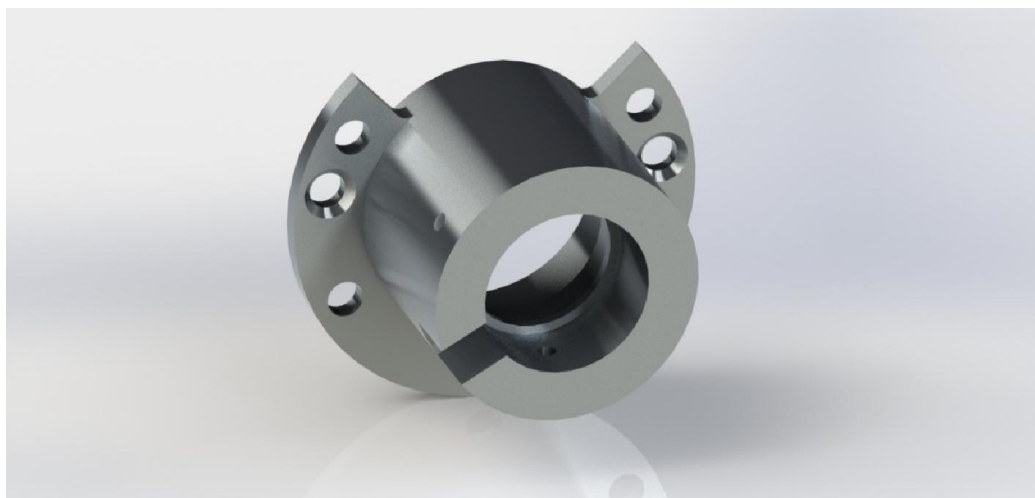


Figura 33 - Peça de suporte do resolver

A peça do suporte do resolver foi feita em liga de Alumínio da série 7075 – T6, e foi feita por maquinagem de um cilindro de um alumínio com diâmetro de 93mm, utilizando um torno CNC e uma fresadora consegue-se obter a peça final.

O rolamento que foi utilizado nesta peça é o 6202-2Z/C3 da SKF, este rolamento garante que aguenta o pequeno esforço que é exigido e ao mesmo tempo, ao ser blindado, não necessita de manutenção. As dimensões deste rolamento são $\Phi 17$ mm de diâmetro interior, $\Phi 40$ mm de diâmetro exterior e 12 mm de espessura.

7.1.2. Veio de transmissão de potência

Em seguida foi modelado o veio de transmissão de potência do motor, para este foram mais uma vez tidas em consideração as dimensões do motor, e para além disso teve de se ter em atenção a potência e o binário debitado. Estes dois valores são importantes pois influenciam a torção a que o veio vai estar sujeito, para fazer de forma rigorosa o dimensionamento do diâmetro do veio dever-se-á calcular o momento torsor a que o veio está sujeito e fazer o cálculo do diâmetro do veio, considerando a tensão de cedência do alumínio, que vai ser o material no qual vai ser feita esta peça. Neste projeto o veio projetado foi dimensionado fazendo uma análise por elementos finitos, por meio de várias iterações foram atribuindo-se valores de diâmetros até se chegar a um que tivesse valores aceitáveis e com um coeficiente de segurança elevado, o resultado completo do teste final pode ser observado no anexo 10. Outro fator relevante nesta peça é a forma como irá ser acoplada o pinhão de ligação a corrente, pois isso vai influenciar o diâmetro exterior do dentado.

O cálculo por elementos finitos foi feito a partir do *software Solidworks*, foi escolhido este programa pois foi a base para a modelação da maioria das peças. Para ser utilizada a ferramenta de simulação do *Solidworks* tem de ser introduzidos alguns dados sobre a peça, tais como o material, neste caso a liga de alumínio 7075-T6 com uma tensão de cedência de 505 MPa, as zonas e o tipo de fixação (encastramento, apoio simples ou apoio duplo) e por último tem de ser introduzido a carga a que vai estar sujeita a peça com a respetiva direção de aplicação.

Nas figuras 34 e 35 pode perceber-se a zonas de fixação e da aplicação da força, de salientar que a fixação da peça é a zona dos 6 furos, nos quais considera-se que a peça está encastada, pois não é permitido qualquer tipo de movimentação da peça. A força exercida na peça é torsional, e como o *software* de simulação não consegue representar forças à torção, teve de se representar a força como uma carga perpendicular a cada dente, fazendo assim uma representação aproximada da torção, como vantagem desta representação tem-se que com este tipo de esforço consegue-se saber se o dentado vai aguentar a solicitação.

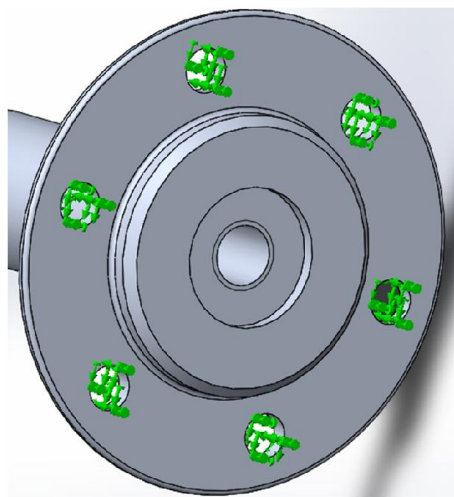


Figura 34 - Zona de fixação do veio de transmissão

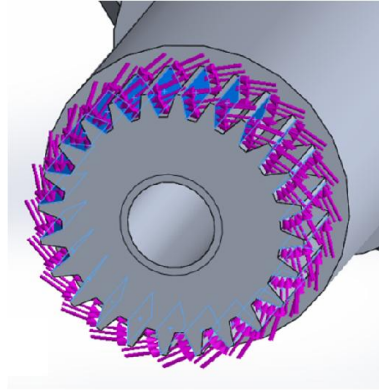


Figura 35 - Zona e direção da aplicação da força no veio de transmissão

Para o cálculo da força exercida ($F_{dentado}$) em cada dente foi utilizada a equação 28, onde o momento aplicado é o momento máximo do motor (M_{motor}), 240 Nm, o raio (r_{flange}) é a distância do centro do veio a ponta do dentado, 10,39 mm, e o número de dentes do dentado é 24.

$$F_{dentado} = \frac{M_{motor}/r_{flange}}{n^{\circ} \text{ de dentes}} \quad 28$$

Obtém-se assim uma $F_{dentado} = 965 \text{ N}$

Como resposta a estes dados obtém-se a massa e o volume da peça, que são aproximadamente $0,337 \text{ kg}$ e $0,13 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Tem-se também o valor máximo de tensão e deslocamento a que a peça esta sujeita. Pode constatar que se fica com um coeficiente de segurança de 1,13, isto para a carga máxima a que a peça vai ser sujeita, mas como o motor vai ter um controlo de aplicação do binário, o dentado não vai ser sujeito a um esforço instantâneo da carga máxima, mas sim uma força crescente com o tempo. Como tensão máxima a peça atinge os 447,39 MPa e tem um deslocamento máximo de 0,22 mm. Tanto a tensão como o deslocamento máximos são mais críticos na zona exterior do dentado. Na figura 36 pode ver-se as zonas de concentração máxima de tensões na peça.

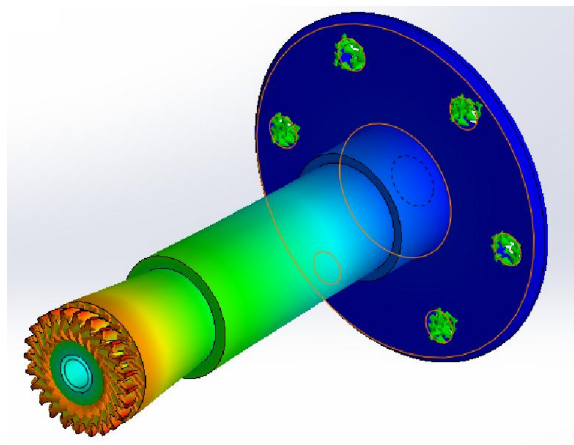


Figura 36 - Simulação da deformação máxima da peça

Esta peça irá ser feita praticamente na sua totalidade por torneamento, sendo que a parte final, onde tem a engrenagem será feita por uma fresa. Na figura 37 pode ver-se a peça modelada em 3D.

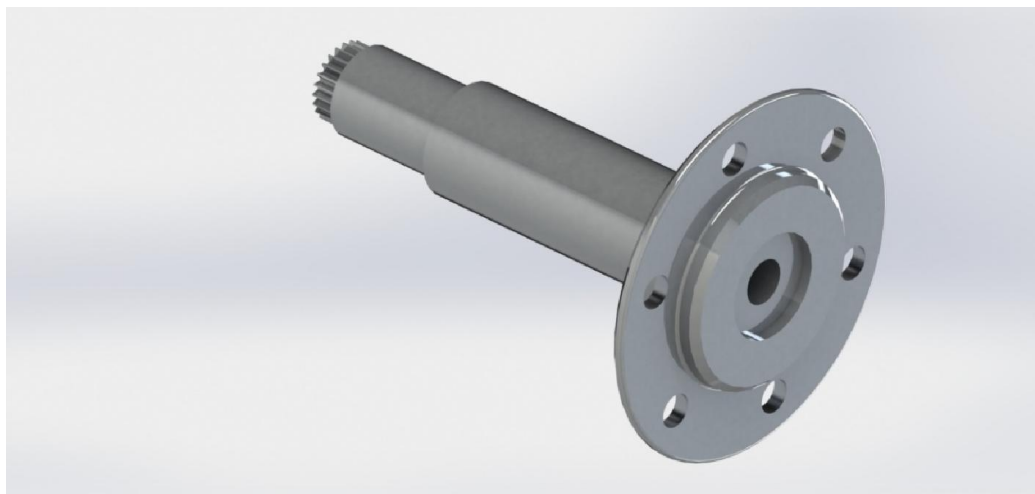


Figura 37 - Veio de transmissão de potência do motor

7.1.3. Veio de transmissão de rotação para o resolver

Após ter estas duas peças modeladas, e para garantir o funcionamento do resolver tem de ser feito um veio que garante a transmissão de rotação do motor para o resolver. Este veio será roscado numa das extremidades, a qual será ligada ao veio de saída de potência do motor, e na outra extremidade terá de ter o diâmetro interior do resolver. O resto da peça deverá ter um diâmetro ligeiramente inferior ao diâmetro interior do motor e um comprimento igual a largura do motor mais o comprimento da peça de suporte do resolver, pois este passa pelo centro do motor ligando o veio de saída de potência ao resolver. Na figura 38 pode ver-se o desenho 3D da peça.

Este veio será troneado a partir de um varão de aço, a escolha deste material deveu-se a necessidade de haver um material com propriedades magnéticas para que o resolver faça a leitura da velocidade de rotação e da posição do motor, logo não se poderia fazer o veio em alumínio.



Figura 38 - Veio de transmissão de rotação para o resolver

7.1.4. Apoio fixo do motor

Depois de modeladas as peças que garantem o correto funcionamento do motor e sua transmissão de potência, são agora explicados os apoios do motor.

O principal apoio do motor é o que fica no lado do resolver, e dos terminais elétricos de ligação, este é o único apoio que é aparafusado ao motor. A modelação desta peça tem como base a zona de aperto no motor e as zonas de ligação ao chassis do carro. Tal como a peça de suporte do resolver teve de ser um corte para passar os tubos de água, este apoio terá de ter esse mesmo rasgo, outro importante corte que tem de ser feito na peça e na zona dos terminais, pois estes têm de ficar a vista para se conseguir ligar os componentes elétricos.

Esta peça tem de ter uma característica importantíssima, para além de ter de aguentar o binário e o peso do motor, tem de ser completamente isolada eletricamente pois fica muito próximo dos terminais, onde passa cerca de 300 V de tensão, por este motivo este apoio teve de ser dimensionado em material polimérico, neste caso em Politereftalato de etileno (PET), com a tensão de cedência de 88 MPa. A escolha do material recaiu sobre este por apresentar das melhores características mecânicas entre alguns dos polímeros técnicos que existem no mercado. Foi feito um estudo por elementos finitos da peça para ver a tensão máxima a que o apoio vai estar sujeito e também a sua deformação máxima, por forma a validar a peça, o relatório deste estudo pode ser visto no anexo 11.

Tal como no veio de transmissão de potência, aqui também tem de se fornecer os dados da peça, as zonas de fixação, a direção e o valor da força aplicada. Neste caso existem duas cargas aplicadas na peça, uma que é devido ao peso do motor elétrico, que é de 12,3 kg, sendo a força exercida no apoio é de 60,5 N, metade do peso do motor, a outra metade do peso será suportada pelo outro apoio. A outra a carga aplicada é mais uma vez torsional, com um momento de 240 Nm, para representação da forma foram definidos planos perpendiculares a cada um dos 5 furos que servem de fixação ao motor, por forma a colocar a força perpendicular a estes mesmos planos. Na figura 39 pode ver-se a definição das zonas de fixação e de aplicação da força.

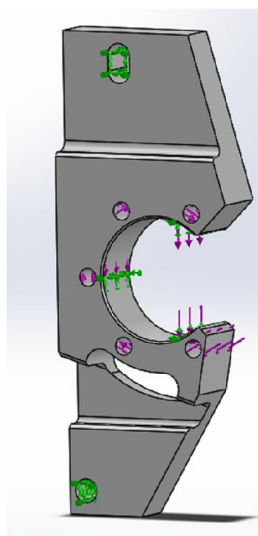


Figura 39 – Apoio fixo - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força

Para o cálculo da força exercida por cada parafuso ($F_{parafuso}$) no apoio foi utilizada a equação 29, onde o momento aplicado é o momento máximo do motor (M_{motor}), 240 Nm, o raio (r_{apoio}) é a distância do centro do furo central do apoio ao centro do furo onde passam os parafusos, 39 mm, e o número de furos para colocação dos parafusos é 5.

$$F_{parafuso} = \frac{M_{motor}/r_{apoio}}{n^{\circ} \text{ de furos}} \quad 29$$

Obtem-se assim uma $F_{parafuso} = 1231 \text{ N}$

Após correr a simulação obteve-se os seguintes resultados, na figura 40 pode ver-se a representação da deformação máxima que a peça sofreria se fosse sujeita a força máxima.

- Massa = 0,462kg
- Volume = $0,325 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
- Tensão máxima atingida = 6,742 MPa
- Deslocamento máximo = 0,003686 mm
- Coeficiente de segurança = 13,5

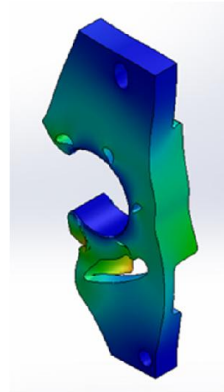


Figura 40 - Simulação da deformação máxima da peça

O elevado coeficiente de segurança deve-se à necessidade a nível geométrico da peça ter a espessura e a largura que tem, deste modo também se tem garantias quase absolutas que a peça aguentará os esforços a que está sujeita. Após a definição da peça ao nível dos esforços mecânicos, esta pode então ser maquinada, neste caso será praticamente toda feita por fresagem. Na figura 41 pode visualizar-se o formato final do apoio.



Figura 41 - Apoio fixo do motor

7.1.5. Apoio de suporte no veio de transmissão de potência do motor

Para garantir o correto posicionamento do motor, e para suporte do mesmo foi feito outro apoio que suportará apenas o peso do motor, não terá nenhuma ligação fixa a este. Esta peça terá um rolamento no seu interior que irá estar em contacto com o veio de saída de potência do motor, fazendo assim o suporte do sistema.

Este apoio já não terá de ser em material polimérico, pois não a risco de passagem de corrente, logo para facilitar a maquinação do apoio foi escolhido como material a liga de alumínio 7075-T6 com uma tensão de cedência de 505Mpa. Este apoio foi modelado tendo em consideração a zona de ligação ao chassis, o diâmetro do veio de saída de potência do motor, que influencia o tamanho do rolamento, e também do anel elástico que prende o rolamento.

Mais uma vez foi feito o estudo por elementos finitos do apoio, que pode ser visto no anexo 12 do presente relatório. Tal como no outro apoio do motor, aqui também tem de se fornecer os dados da peça, as zonas de fixação, a direção e o valor da força aplicada. Neste caso existe apenas uma carga aplicada na peça, que é metade do peso do motor elétrico, que é de 6,15 kg, sendo a força exercida no apoio de 60,5 N. Nesta peça não existe nenhum tipo de esforço de torções pois no furo central da peça existe um rolamento, que apoia o veio de transmissão de potência, e absorve qualquer momento torsor existente. Na figura 42 pode ver-se a definição das zonas de fixação e de aplicação da força.

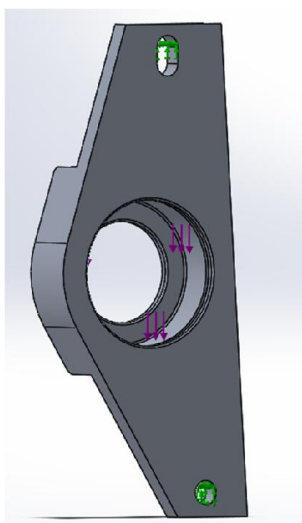


Figura 42 – Apoio de suporte - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força

Após correr a simulação obteve-se os seguintes resultados na figura 43 pode visualizar-se a representação da deformação máxima que a peça sofreria se fosse sujeita a força máxima.

- Massa = 0,711kg
- Volume = $0,253 \times 10^{-3} m^3$
- Tensão máxima atingida = 0,688 MPa
- Deslocamento máximo = 0,00036 mm
- Coeficiente de segurança = 734

O elevado coeficiente de segurança neste caso deve-se tanto por motivos geométricos como sobretudo pelo rolamento selecionado, pois o rolamento escolhido tem as dimensões de 72 mm de diâmetro exterior, 30 mm de diâmetro interior e 19 mm de largura, a escolha deste rolamento deveu-se a sua capacidade de carga dinâmica e de velocidade de rotação que este aguenta.

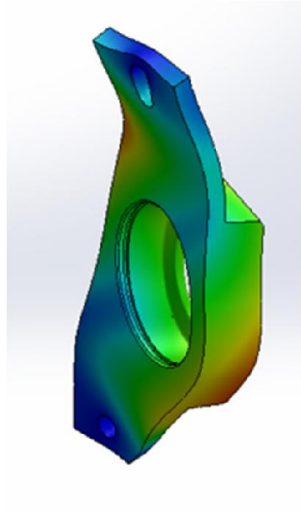


Figura 43 - Simulação da deformação máxima da peça

Após a definição da peça ao nível dos esforços mecânicos, esta pode então ser maquinada, neste caso será praticamente toda feita por fresagem. Na figura 44 pode ver-se o formato final do apoio.

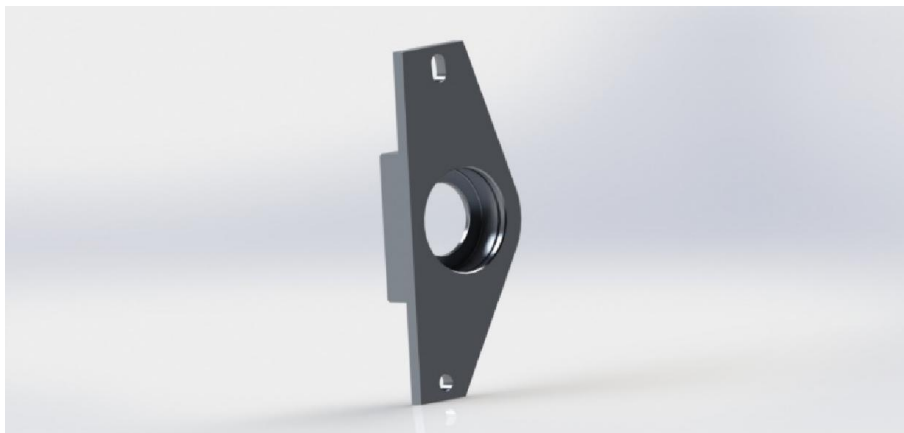


Figura 44 - Apoio de suporte no veio de transmissão de potência do motor

Na figura 45 pode observar-se a montagem do conjunto de todas as peças até agora mencionadas.

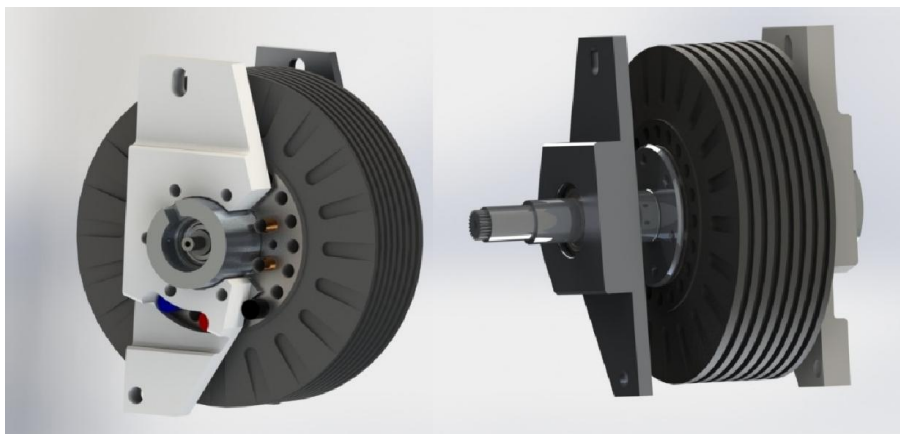


Figura 45 - Conjunto do motor mais apoios, resolver e veios de transmissão de potência e rotação

7.1.6. Peças de refrigeração do controlador eletrônico

O controlador eletrônico do motor é uma das peças fundamentais na construção de um veículo elétrico, neste é feita a gestão dos vários sensores do carro e o componente que faz a transmissão da potência elétrica ao motor. Por este motivo, este elemento sofre grande aumento de temperatura e é necessário ter um bom arrefecimento, para que este consiga fornecer corretamente o motor. Deste modo foi modelado dois tipos de refrigeradores, com base nos arrefecedores projetados pela empresa *Infineon*, foram modelados em 3D estes componentes, para que pudessem ser maquinados a posteriori.

Foram projetados dois arrefecedores pois na faculdade existiam dois tipos de controladores, e como ainda não se tinha a certeza qual iria ser utilizado, acabou-se por produzir os dois.

Nas figuras 46 e 47 pode observar-se duas peças em 3D, de salientar que a primeira esta representada em corte, para que se consiga ver o formato em serpentina. Estes dois elementos foram maquinados a partir de blocos de alumínio da liga 7075-T6.



Figura 46 - Representação da placa de refrigeração em tanque do controlador



Figura 47 - Representação da placa de refrigeração em serpentina do controlador

7.2. Modelação Caixas de baterias

As caixas de baterias são fundamentais na montagem dos packs de baterias para o fórmula elétrico. Como foi visto no capítulo 6 as caixas de baterias foram projetadas para ter um número específico de células de baterias, neste caso 72 células, com a distribuição destas de forma ordenada, como se pode ver na figura 30. Com a dimensão de cada bateria, figura 48, consegue-se chegar ao tamanho mínimo que cada caixa terá de ter.

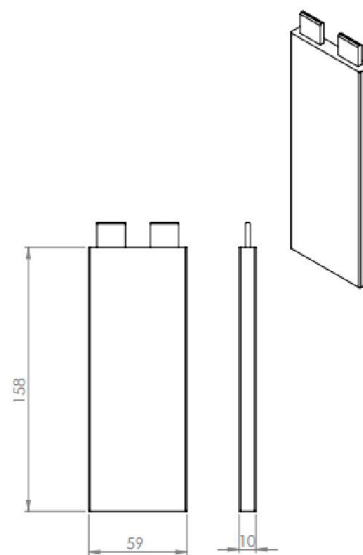


Figura 48 - Dimensões de uma célula de bateria

No caso da largura da caixa sabe-se, pelo capítulo 6, que vamos ter quatro conjuntos de três células em paralelo mais um espaço para circulação do ar, que tem a mesma espessura que uma célula. Logo calculando a partir da seguinte fórmula, fica-se a saber a largura mínima necessária.

$$Largura_{caixa} = (n^{\circ} \text{ de células}_{paralelo} + n^{\circ} \text{ zonas}_{circ. de ar}) \times 4 \times espessura \quad 30$$

Com este cálculo obtém-se um valor para a largura de 160mm.

Após o cálculo da largura tem também de se saber dimensionado o comprimento da caixa, para isso recorremos a uma fórmula muito idêntica a anterior, sendo que muda a espessura para a largura das células e as zonas de circulação de ar que já não são do tamanho de uma bateria, mas sim de aproximadamente 15 mm.

$$\text{Comprimento}_{\text{caixa}} = n^{\circ} \text{ de colunas}_{\text{células}} \times (\text{largura} + \text{largura}_{\text{circ. de ar}}) \quad 31$$

Com este cálculo obtém-se um valor para a comprimento de 444mm.

Para a altura das caixas não é necessário grandes cálculos, só é necessário altura total de uma célula e a este valor acrescentar 15mm de espaçamento do fundo da caixa para circulação de ar. Ficando assim com uma altura mínima da caixa de 173mm.

Após obter-se as dimensões todas, e com base nas caixas que tinham sido projetadas pela empresa EFACEC para as baterias do carro do CEIIA, foram desenhadas as novas caixas em chapa de alumínio com espessura de 1mm. Estas permitiram poupar cerca de 65% do peso, ao ser feitas neste material, em substituição do aço, que tinha sido a escolha da EFACEC. Em seguida, figuras 49 e 50, pode ver-se o desenho 2D das caixas.

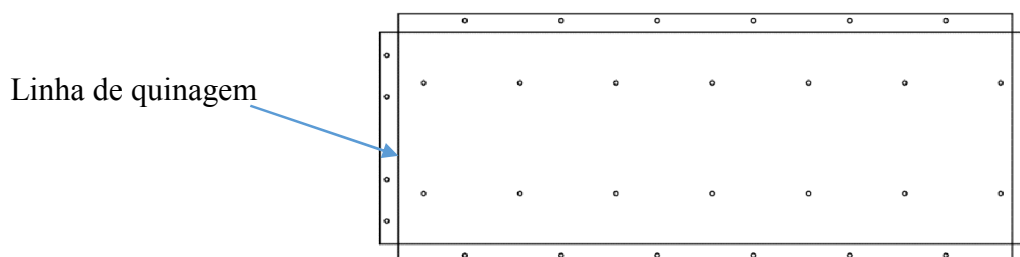


Figura 49 - Parte lateral das caixas de baterias

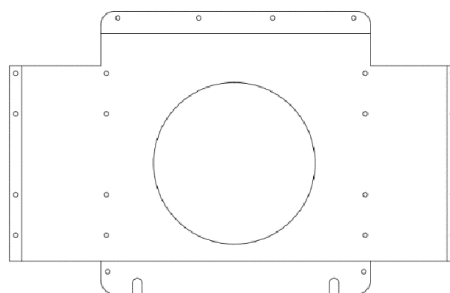


Figura 50 - Peça de topo das caixas de baterias

Nas figuras 49 e 50 vê-se duas das peças que compõem as caixas, cada caixa terá duas peças de cada tipo. Nestas imagens pode observar-se que existem linhas de quinagem, como a que assinalada na figura 47.

Um pormenor a ter em atenção na chapa de topo é o círculo cortado que existe no centro da placa, este vai ser para uma posterior montagem de uma ventoinha que permitirá fazer o arrefecimento do pack.

Para que as chapas após serem quinadas tenham os furos concêntricos, por forma a permitir a correta montagem da caixa, teve de ser calculado o tamanho real da chapa antes da quinagem. Como ao ser realizado uma conformação plástica na chapa, esta vai aumentar o seu tamanho, para fazer o acerto foram utilizadas as seguintes fórmulas de cálculo.

Com: $h = \text{espessura da chapa}$

$\beta = \text{ângulo de quinagem}$

$r_i = \text{raio de quinagem}$

$$\Delta l = \pi \times \left(\frac{180 - \beta}{180} \right) \times \left(r_i + \frac{h}{2} \times k \right) - 2 \times (r_i + h) \quad 32$$

Para calcular a constante k tem de se saber se a relação $\frac{r_i}{h}$ é maior ou menor que 5.

$$\frac{r_i}{h} = 1,875 \quad 33$$

Logo como é menor que 5, o valor de k calcula-se a partir da seguinte fórmula:

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} \times \log_{10} \frac{r_i}{h} \quad 34$$

Com a realização destes cálculos garante-se que as chapas vão ficar corretamente posicionadas, permitindo assim a sua ligação. As diferentes peças irão ser unidas por rebites e fusos roscados que ligaram as partes laterais, e ao mesmo tempo darão consistência a estrutura.

Na figura 51 e 52 pode observar-se as tampas de cima e de baixo da caixa. A peça do fundo é em chapa de alumínio e serve para fechar a caixa. Já a parte de cima é uma peça fulcral da caixa, esta é feita em policarbonato de 3mm e em todas as chapas que se pode observar na figura 52 que permitem fazer as ligações elétricas das diferentes células. A forma como estas estão dispostas tem um a ordem específica, permitindo fazer as ligações em paralelo e em série de uma forma extremamente simples.

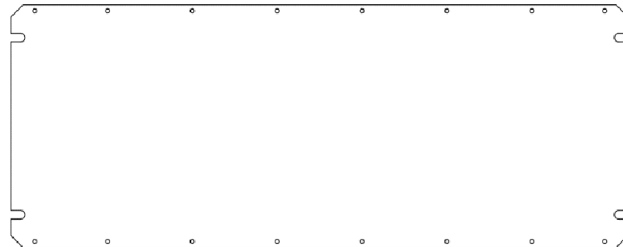


Figura 51 - Peça do fundo da caixa



Figura 52 - Parte de cima da caixa de baterias com algumas das ligações elétricas

Após a montagem das caixas com as respetivas baterias, foi montado também todo o balanceamento do pack. As placas de controlo eletrónico estão posicionadas na parte de cima da caixa e também nas laterais, para garantir a sua proteção e evitar algum dano, foi dimensionado e construído uma proteção em policarbonato, como se pode ver na figura 53, esta envolve toda a caixa e garante assim a integridade do pack de baterias. A escolha de um material polimérico deveu-se a sua propriedade de isolamento elétrico, assim ao colocar esta caixa garante-se também o isolamento da caixa do restante chassis.

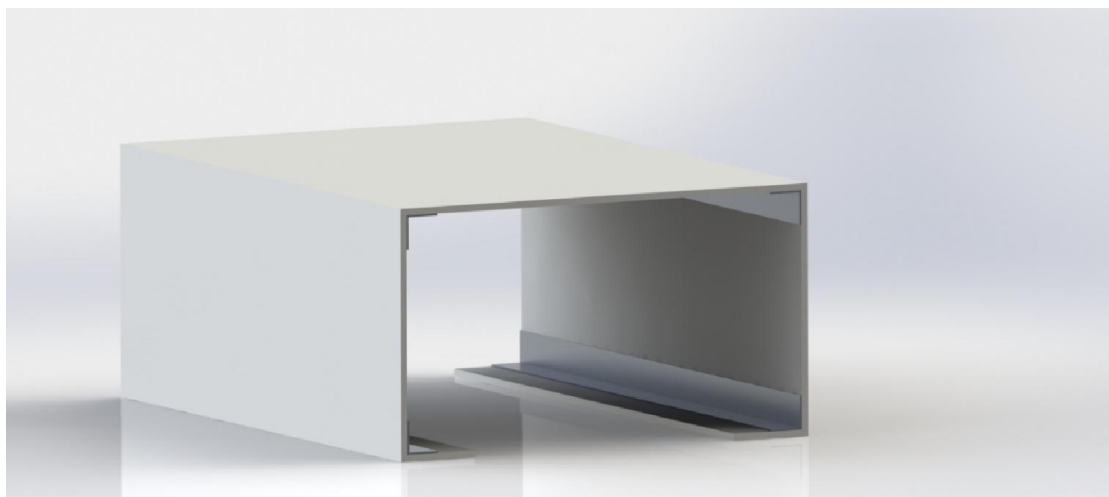


Figura 53 - Cobertura do pack de baterias

Quando foi feito o estudo da dimensão disponível no fórmula *Glória* para a colocação das caixas, viu-se que na zona do motor de combustão só cabem duas caixas iguais as explicadas em cima. Deste modo, e como é necessário três caixas, procedeu-se a montagem de duas meias caixas, ficando estas na parte lateral do monolugar, como se pode ver na figura 54. Assim teve de se voltar a dimensionar as caixas de baterias, sendo necessário fazer a placa do fundo, a de cima e as de topo com metade da largura. A representação do chassis do fórmula que pode ser vista na figura abaixo, foi desenhada para facilitar a medição e a visualização da montagem, e do espaço disponível para colocar as diferentes peças.

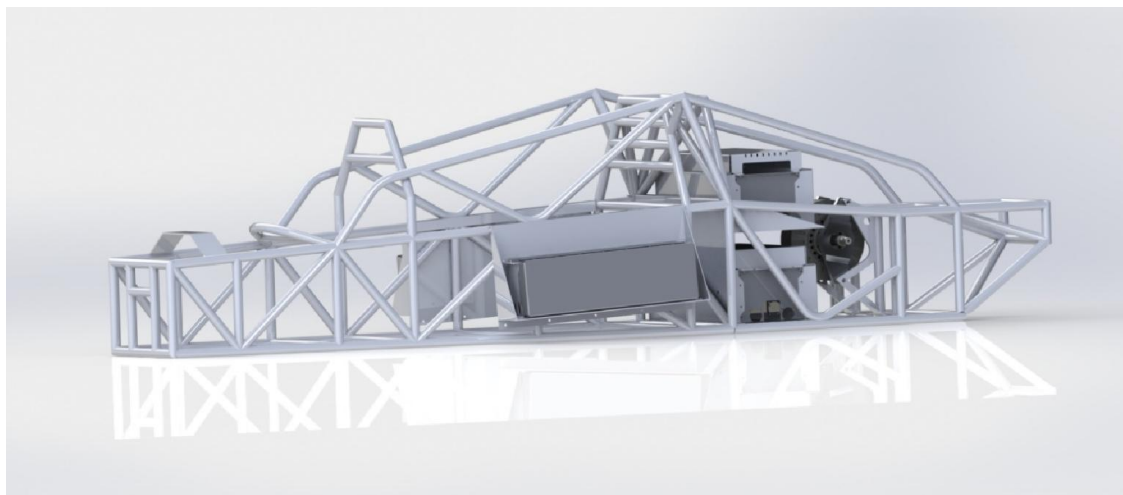


Figura 54 - Representação do chassis do fórmula Glória com as respetivas baterias e motor elétrico

Nas figuras 55 e 56 pode visualizar-se as chapas que tiveram de ser alteradas para as zonas laterais do carro. De salientar que as placas de topo já não possuem o corte circular para a ventoinha, mas têm um corte, neste caso retangular, que permite a refrigeração. Como estes packs estão montados num sítio que tem uma grande circulação de ar não é necessário fazer uma circulação forçada de ar.

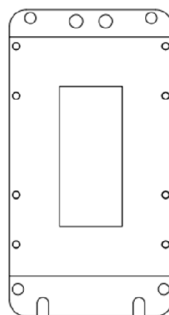


Figura 55 - Peça de topo com metade da largura

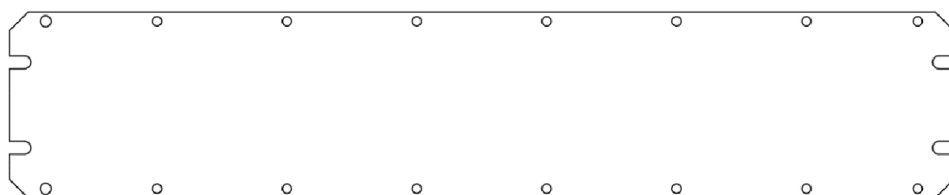


Figura 56 - Peça do fundo com metade da largura

Terminado o estudo e modelação das caixas procedeu-se ao fabrico das mesmas, com a ajuda do INEGI foram conformadas as peças para uma das caixas de maior dimensão. Esta primeira caixa ainda é o protótipo, que serviu para confirmar se as furações e os cálculos de quinagem ficaram bem realizados. Nas figuras 57 e 58 pode visualizar-se, em primeiro lugar, todas as peças desmontadas, na segunda figura observa-se uma pequena representação da caixa montada. De salientar que as peças assinaladas com a seta não serão utilizadas, sendo substituídas pela cobertura em policarbonato que foi representada na figura 53.

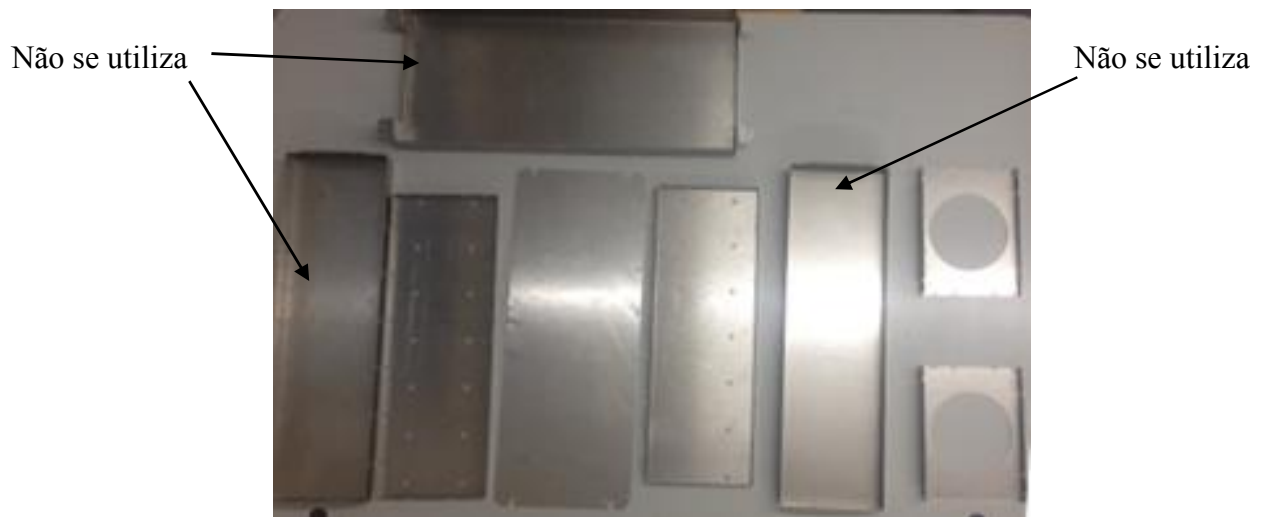


Figura 57 - Conjunto de peças em alumínio para montagem de um pack de baterias

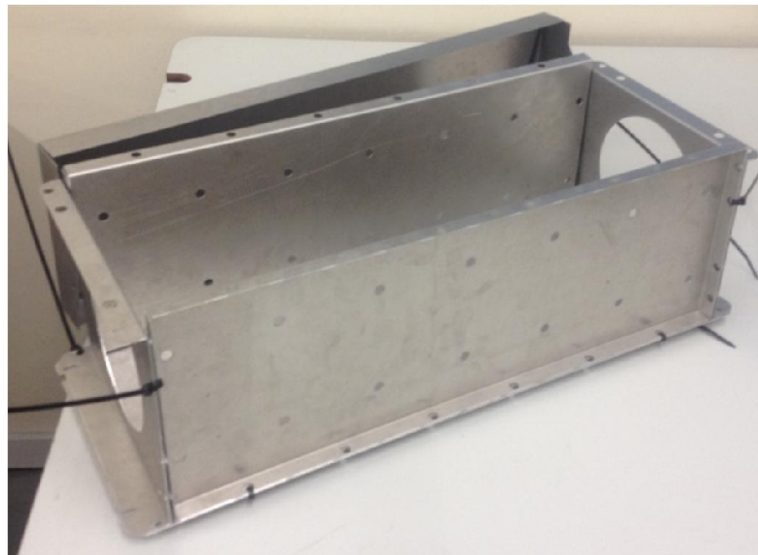


Figura 58 - Caixa de baterias em alumínio montada

Antes da montagem das baterias e dos balanceamentos nestas novas caixas, foram montadas as caixas projetadas pela EFACEC. Foram utilizadas estas caixas em primeiro lugar para que fosse possível testar as baterias e o controlo eletrónico o mais rápido possível, pois as caixas em alumínio ainda não estão todas fabricadas. O aspecto final das caixas, ainda sem cobertura pode ser observado na figura 59.

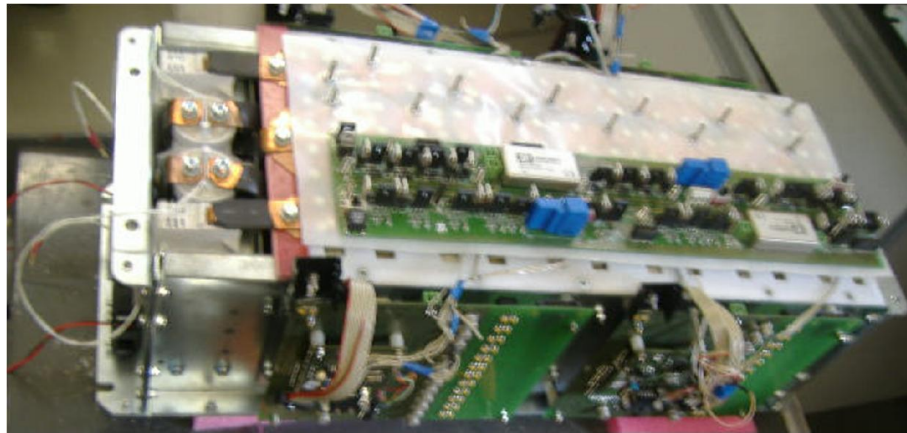


Figura 59 - Caixa de baterias completa

Este pack, juntamente com outros dois conjuntos vão ser testados no FIAT Uno elétrico da FEUP, fazendo assim o teste final antes da montagem nas caixas em alumínio e posteriormente no fórmula.

7.3. Modelação dos apoios dos packs de baterias

Os packs de baterias depois de totalmente montados têm de ser fixados ao chassis do fórmula, na figura 60 é possível ver alguns dos apoios nos respetivos sítios onde vão ficar montados. Estes suportes foram dimensionados, recorrendo a uma simulação por elementos finitos. Para se conseguir fazer esse cálculo é necessário saber a massa de cada pack de baterias, esse cálculo já está feito na tabela 16. A esta massa tem de se acrescentar toda a estrutura da caixa e os componentes elétricos. Sabendo o peso em baterias, cerca de 145,1 N, pode estimar que todos os outros componentes deverão ter aproximadamente 8 kg, logo 80 N, ficando assim com um peso total por pack de 225,1N. Este valor terá de ser majorado por forma a ter-se um coeficiente de segurança, neste caso irá se utilizar uma carga de 270 N, ficando assim com um coeficiente de segurança de aproximadamente 1,2. De salientar que existem dois packs de metade do tamanho, logo terão aproximadamente metade do peso, cerca de 135 N.

Após se ter estes dados sobre o peso, e recorrendo mais uma vez ao *software Solidworks*, calculou-se a tensão e deformação máximas exercidas em cada suporte. De seguida são apresentados a modelação 2D e 3D de cada placa, com a respetiva simulação por elementos finitos.

Na modelação 2D das placas teve de ser ter em consideração mais uma vez as fórmulas de cálculo 32 à 34, onde está especificado o aumento de chapa quando esta sofre uma conformação plástica.

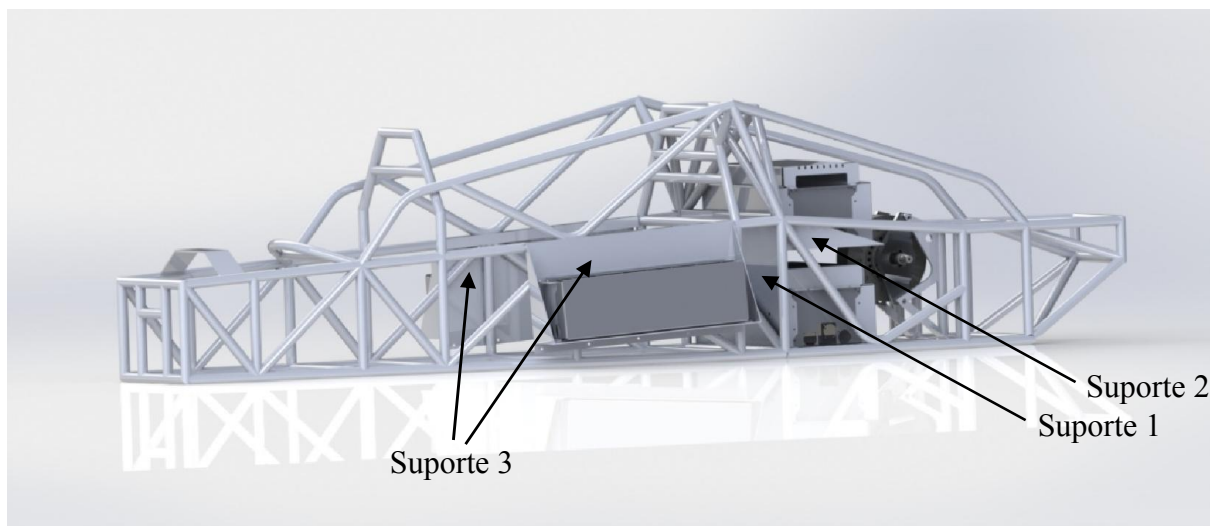


Figura 60 - Representação do chassis do fórmula Glória com as respectivos suportes das baterias

7.3.1. Suporte 1

Este primeiro suporte tem uma das caixas grandes, com as 72 células, ele vai ser fixo por quatro furos, onde irão passar duas abraçadeiras em “U” roscadas na ponta, iguais a da figura 61, e ainda será apoiado em dois tubos do chassis para garantir melhor estabilidade.



Figura 61 - Abraçadeira em "U"

Na figura 62 está representado o desenho do suporte em 2D. Neste pode observar-se as linhas de quinagem e os furos que vão servir de ligação ao suporte 2, os quatros furos, que foram referidos anteriormente, não estão desenhados em 2D pois ainda não se conseguiu tirar medidas corretas da sua posição, estes irão ser feitos a posteriori e serão feitos manualmente. O pack de baterias ficará apoiado na parte inferior do suporte e será fixado por quatro parafusos, os furos para estes parafusos também ainda não estão feitos pois pode haver a necessidade de chegar ligeiramente para um lado ou para o outro o pack.

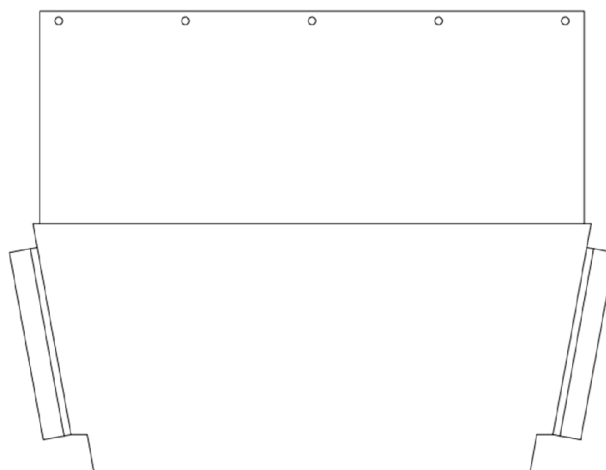


Figura 62 - Desenho 2D do suporte 1

Para validar o desenho e poder proceder-se à conformação plástica da chapa, foi feita a modelação 3D do suporte, para posterior simulação por elementos finitos. Na figura 63 pode ver-se o desenho 3D da placa. De salientar que para a representação 3D foram feitos os furos de ligação ao chassis, pois para a simulação necessita-se destes quatro furos, que servem de fixação.

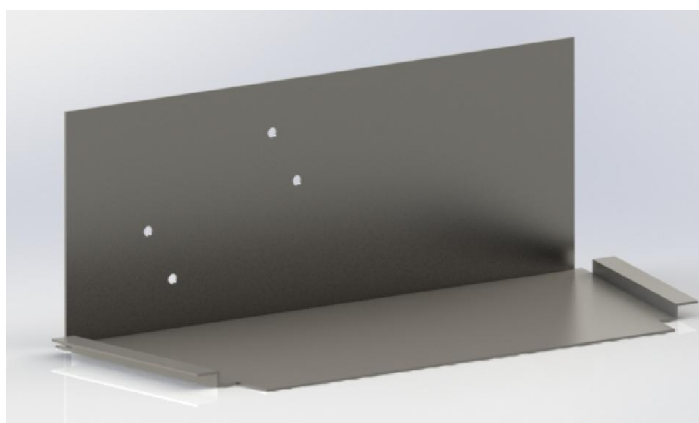


Figura 63 - Representação 3D do suporte 1

Toda a chapa foi dimensionada com 3 mm de espessura em aço, a escolha deste material e espessura foi feita após várias iterações, começando por fazer em chapa de alumínio de 5mm, depois passando para o aço pois só com uma espessura muito grande conseguir-se-ia aguentar a carga, quando a escolha já era o aço foi testadas vários tipos de espessuras para se conseguir obter relação entre deslocamento máximo e o peso do suporte.

Na figura 64 consegue ver-se as zonas de fixação e a zona de carga que o suporte está sujeito.

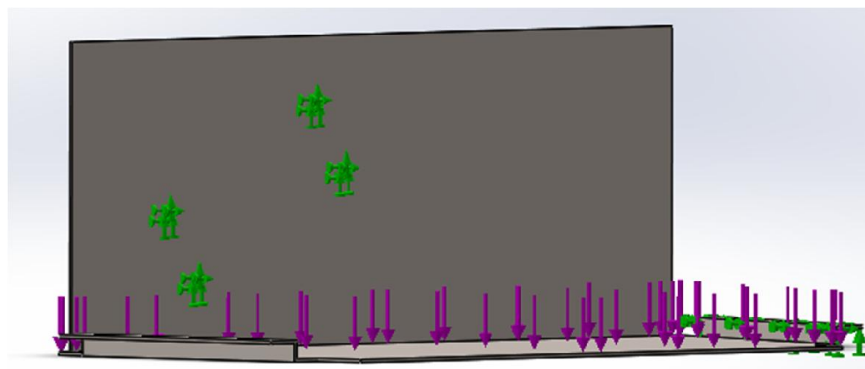


Figura 64 – Suporte 1 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força

Após correr a simulação obteve-se os seguintes resultados:

- Tensão máxima = 49,13 MPa
- Deformação máxima = 1,33 mm
- Coeficiente de segurança = 12

De salientar que o aço escolhido apresenta uma tensão de cedência de 620 MPa.

O valor do coeficiente de segurança é ligeiramente elevado, mas para se conseguir ter uma deformação baixa tinha-se de colocar o material da chapa em aço e a espessura tem de ser de 3 mm, fazendo por isso aumentar o coeficiente de segurança.

Desta análise ainda se consegue tirar a massa total deste suporte, que é de 5,5 kg. No anexo 13 pode ver-se mais detalhadamente todo o relatório da simulação.

7.3.2. Suporte 2

O segundo suporte de baterias terá a segunda caixa grande, este será fixado ao primeiro suporte por meio de cinco parafusos, e terá uma zona que irá abraçar um dos tubos do chassis por forma a fazer uma melhor fixação. Nas figuras 65 e 66 estão representados os desenhos 2D do suporte, mais uma vez faltam os furos de fixação do pack, que serão feitos à posteriori, pela mesma razão que foram mencionadas para o primeiro suporte.

Este suporte foi feito em três partes, a parte central que suporta as baterias, as duas peças laterais triangulares servem para garantir maior rigidez ao conjunto e diminuir assim a tensão e o deslocamento máximo.

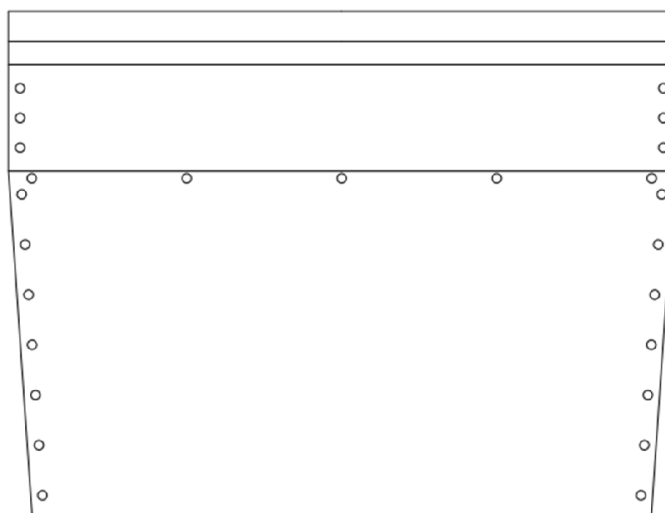


Figura 65 - Representação 2D da parte central do suporte 2

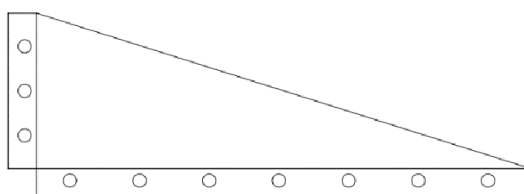


Figura 66 - Representação 2D do triângulo de aumento de rigidez

Para garantir a ligação entre o suporte 1 e o 2 foi projetada uma peça de ligação, como se pode verificar na figura 67.

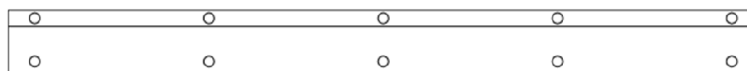


Figura 67 - Representação 2D da chapa de fixação entre o suporte 1 e 2

Na modelação 3D do suporte teve de se considerar todas estas peças como uma só, pois o programa de simulação não consegue calcular tensões caso as peças estejam separadas. Deste modo foi modelada a peça que se pode ver na figura 68.

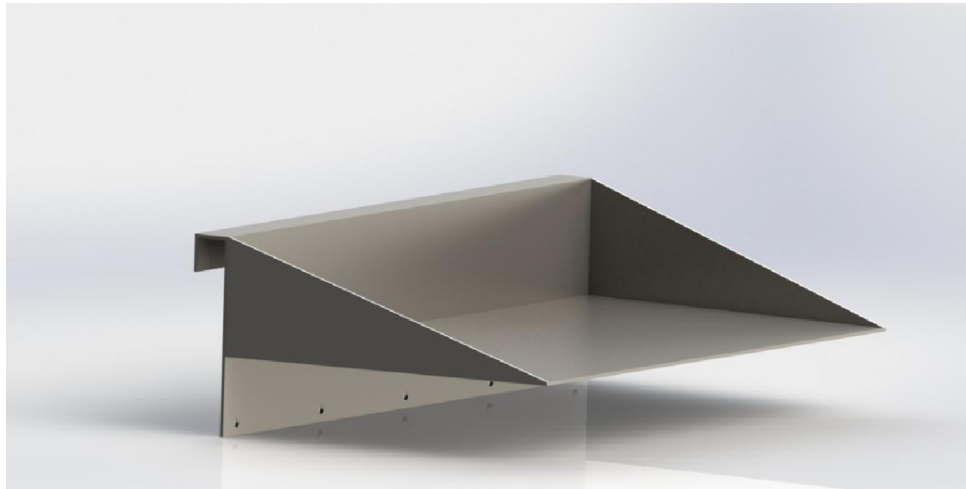


Figura 68 - Representação 3D do suporte 2

Tal como o suporte anterior este também será feito em chapa de aço de 3 mm de espessura. Na figura 69 consegue ver-se as zonas de fixação e de carga do suporte, de salientar que a carga irá ser a mesma que a do primeiro suporte, 270 N.

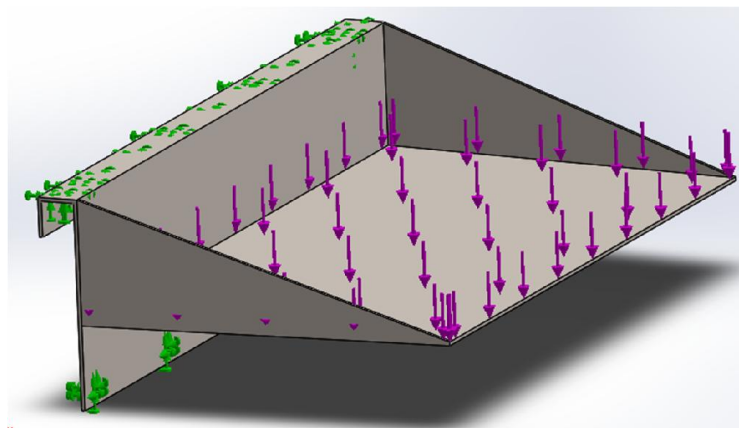


Figura 69 - Suporte 2 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força

Após correr a simulação obteve-se os seguintes resultados:

- Tensão máxima = 25,1 MPa
- Deformação máxima = 1,02 mm
- Coeficiente de segurança = 24,8

Mais uma vez o coeficiente de segurança é elevado, e pela mesma razão que a apresentada anteriormente este não pode ser diminuído, pois não se pode alterar o material da chapa nem a espessura.

Como última análise deste suporte de realçar que irá ter um peso aproximado de 7,5 kg. No anexo 14 pode ver-se mais detalhadamente todo o relatório da simulação.

7.3.3. Suporte 3

O suporte 3 não é apenas um suporte mas sim dois iguais, um para cada lateral do carro, estes irão suportar os meios packs de baterias. Estes suportes serão fixados ao chassis pelo mesmo método do primeiro suporte, e terão uma zona que irá abraçar um dos tubos do chassis por forma melhorar a fixação. Nas figuras 70 e 71 estão representados os desenhos 2D do suporte, mais uma vez faltam os furos de fixação do pack, que serão feitos à posteriori, pela mesma razão que foi mencionada para os outros dois suportes.

Este suporte foi feito em três partes, tal como o suporte 2, a parte central que suporta as baterias, as duas peças laterais triangulares servem para garantir maior rigidez ao conjunto e diminuir assim a tensão e o deslocamento máximo.

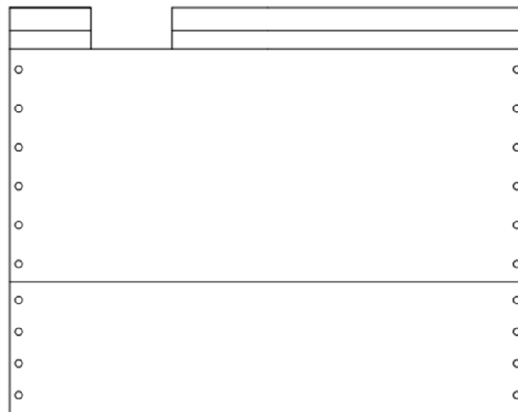


Figura 70 - Representação 2D da parte central do suporte 3

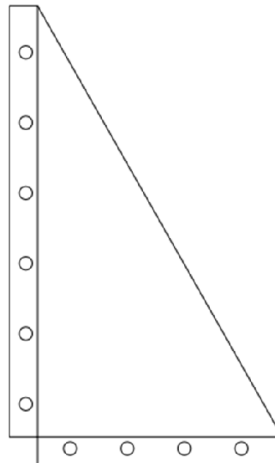


Figura 71 - Representação 2D do triângulo de aumento de rigidez

Na modelação 3D do suporte teve mais uma vez de se considerar todas estas peças como uma só. Deste modo foi modelada a peça que se pode ver na figura 72.

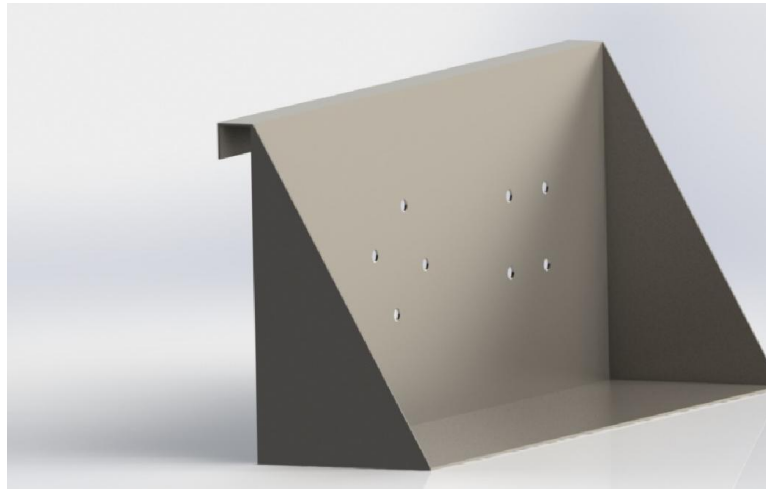


Figura 72 - Representação 3D do suporte 3

Este suporte será feito em chapa de 2 mm de espessura, pois irá sofrer uma menor carga, 135 N. Por este motivo os cálculos de quinagem desta peça foram novamente feitos, para se poder proceder ao fabrico das chapas.

Na figura 73 consegue ver-se as zonas de fixação e de carga do suporte.

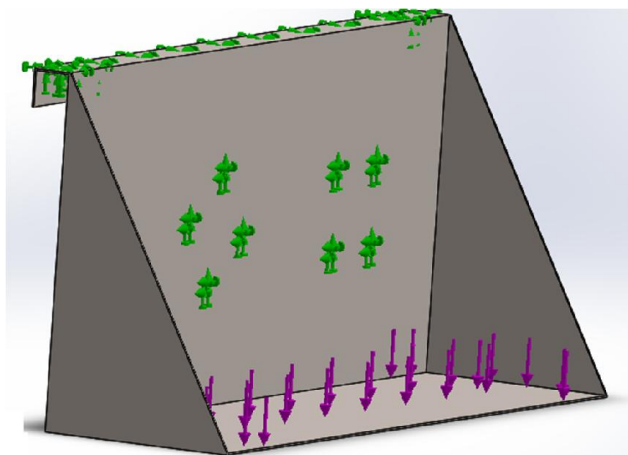


Figura 73 - Suporte 3 - zonas de fixação e de aplicação da força - a verde está representado a fixação e a roxo a força

Após correr a simulação obteve-se os seguintes resultados:

- Tensão máxima = 67,2 MPa
- Deformação máxima = 1,15 mm
- Coeficiente de segurança = 9,2

Desta vez pode ver que o coeficiente de segurança é ligeiramente inferior às dos dois suportes anteriores, mas pelas mesmas razões que foram apresentadas anteriormente este valor não pode ser diminuído.

Como última análise deste suporte de realçar que irá ter um peso aproximado de 4,8 kg. No anexo 15 pode ver-se mais detalhadamente todo o relatório da simulação.

Capítulo 8 – Testes em pista

Este oitavo capítulo refere-se aos testes realizados ao fórmula *Glória* B4 com o motor a combustão. Estes ensaios foram realizados no circuito Vasco Sameiro, em Braga, a escolha deste circuito deveu-se à proximidade com a faculdade.

8.1. Teste fórmula com o motor a combustão

Os ensaios realizados ao fórmula *Glória* basearam-se em testes de arranque, pois é o que se pode comparar diretamente entre o motor térmico e o elétrico. O testes de tempo por volta não são importantes quando se está a modificar um carro a combustão para elétrico, pois a dinâmica do veículo continua a ser praticamente a mesma, podendo só existir uma pequena mudança da posição do centro de massa do veículo. Já a nível de aceleração e a velocidade máxima atingida são dois testes que tem grande influência com a mudança de motor e de caixa de velocidades.

Como referido nos capítulos anteriores, o motor elétrico possui um maior binário máximo e uma menor velocidade de rotação, claro que o que importa não é a velocidade nem o binário ao motor, mas sim à roda. Neste ponto, pelos cálculos teóricos o motor elétrico será mais lento que o motor térmico, tanto a nível de aceleração como em velocidade máxima.

Para se poder comprovar todos os cálculos teóricos apresentados nos anteriores capítulos, foram realizados testes, primeiramente ao fórmula com o motor térmico, para posterior comparação com os testes com o motor elétrico.

Foram realizados seis testes de arranque na reta do circuito Vasco Sameiro, esta tem um comprimento de 898 metros. De salientar que o teste de arranque não começavam no início da reta, foram sempre deixados cerca de 100 metros no início da reta e 150 m no final para a travagem. Dando assim um total de espaço percorrido de aproximadamente 650 metros.

Na tabela 18 pode visualizar-se a comparação entre os seis testes, consegue-se perceber que nem todos os arranques foram feitos a mesma velocidade de rotação, e que isto teve influência no tempo de aceleração dos 0-100 km/h e na velocidade máxima atingida.

Os valores das velocidades foram retirados da folha de cálculo que se encontra no anexo 4, onde para cada velocidade de rotação e dependendo da mudança em que está consegue-se retirar a velocidade à roda. Como na tabela as de velocidades, na gama das 9000 rpm até as 10500 rpm, só são calculas de 2500 em 2500 rpm, foram feitas aproximações das velocidades lineares em função das rotações lidas no *software* de dados do fórmula, estes programa irá ser explicado em seguida.

Para a obtenção dos dados em pista foi utilizado o *datalogger* que vem incorporado no fórmula *Glória* B4, este dispositivo é da *AIM* e o modelo é o *MyChron4*. Este aparelho faz a leitura dos seguintes sensores do motor e do carro: rotação da cambota, temperaturas de água e óleo e velocidade à roda. Após a recolha desses dados o *software* guarda-os em gráficos em função do tempo decorrido. Para além da recolha de dados o *datalogger* tem a capacidade de mostrar os dados em tempo real, ele possui um monitor onde mostra ao piloto as diferentes temperaturas, rotação do motor, velocidade a roda e a mudança em que o piloto se encontra. Este aparelho ainda tem a possibilidade de avisar o piloto quando deve efetuar a mudança de

caixa, esse aviso é controlado pela rotação a que está o motor, e pode ser ajustado ao valor que o piloto pretenda.

Tabela 18 - Resultados dos testes realizados no circuito Vasco Sameiro

	Tempo (s)	Rotação(rpm)	Velocidade(km/h)	Mudança
1º Teste	0	6774	0	1º
	4,98	9735	100	1º
	18,10	9563	204	5º
2º Teste	0	6663	0	1º
	4,41	9718	100	1º
	15,73	9198	199	5º
3º Teste	0	7326	0	1º
	4,35	9739	100	1º
	17,14	9544	204	5º
4º Teste	0	6566	0	1º
	4,14	9783	100	1º
	16,65	9439	204	5º
5º Teste	0	6945	0	1º
	4,97	9769	100	1º
	16,80	9432	204	5º
6º Teste	0	3998	0	1º
	3,26	9750	100	1º
	18,63	10012	215	5º

Outro fator que levou a diferença de tempos foi a forma como o arranque foi realizado, como foi solto o pedal da embraiagem, influenciando o escorregamento das rodas, e a variação da velocidade de rotação. Nos gráficos 16 e 17 estão apresentados dois arranques, onde temos a velocidade de rotação (rpm) em função do tempo (s), daqui pode ver-se que no primeiro caso existe uma grande variação da velocidade de rotação até se atingir a estabilidade na curva e o carro começar a andar.

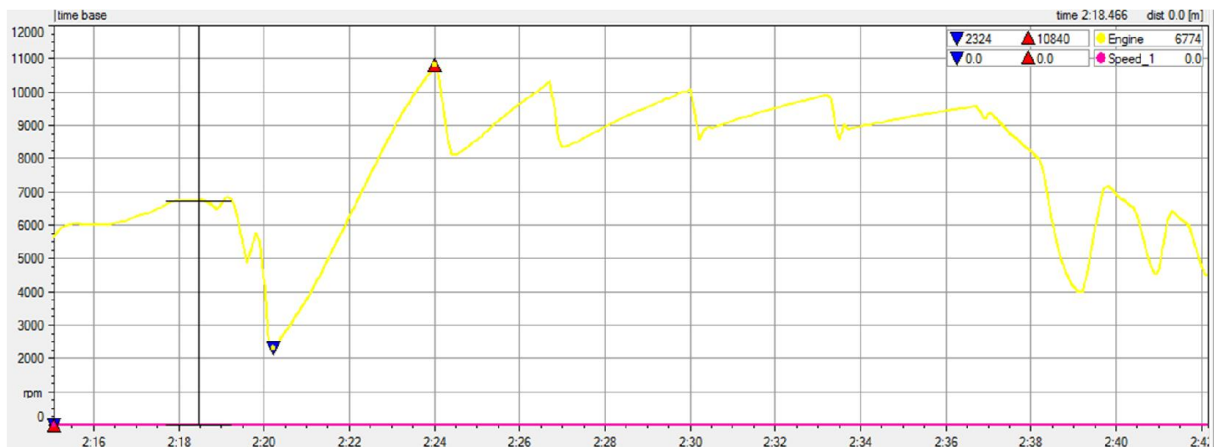


Gráfico 16 - Variação das rotações do motor em função do tempo para o 1º teste

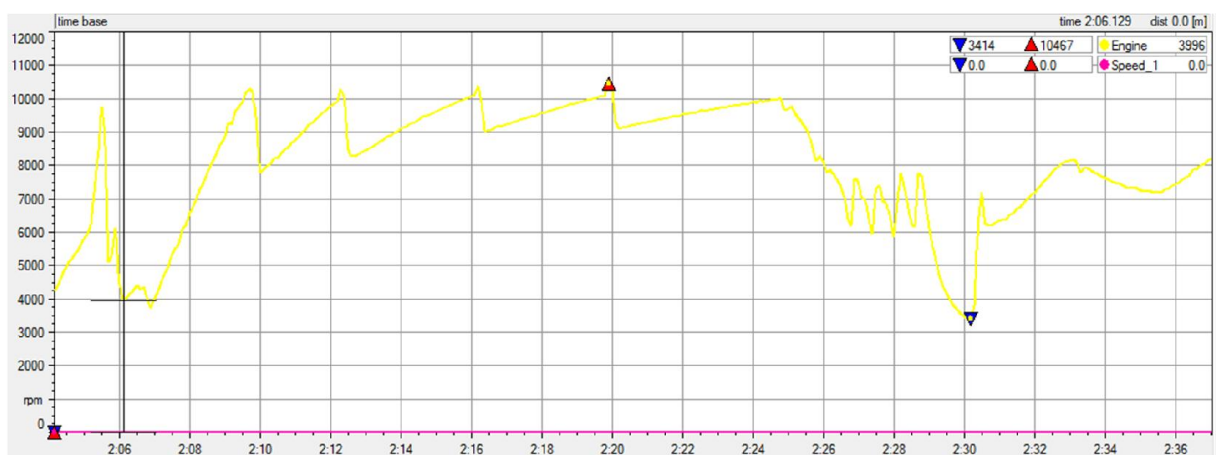


Gráfico 17 - Variação das rotações do motor em função do tempo para o 6º teste

Após a análise dos dois gráficos fica-se com todos os dados retirados para posterior comparação com o motor elétrico. De salientar que a velocidade à roda poderia ter sido retirada diretamente do *datalogger* mas por existir uma avaria no sensor de medição da velocidade linear, teve de ser utilizar a folha de cálculo do anexo 1.

Antes de apresentar as conclusões deve referir-se que os primeiros cinco testes em pista foram realizados pelo autor desta tese, e o sexto por um convidado externo a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o Eng. Nuno Magalhães diretor da *Comval Racing*, equipa de competição automóvel nacional. Por este motivo só será utilizado os dados do sexto teste pois são os que mais se aproximam das reais capacidades do carro.

Concluindo assim este capítulo deve salientar-se que o teste de aceleração dos 0-100 km/h revelou que o tempo que a marca diz, de 3,11 segundos, e o tempo realizado pelo Eng. Nuno Magalhães, de 3,26 segundos, se aproximam, pode então assim validar-se os testes realizados.

8.2. Validação do sistema powetrain

Com o objetivo de testar o sistema composto pelo motor elétrico, controlador e baterias, para posteriormente montar no fórmula, foi feita a montagem do motor no FIAT Uno elétrico da FEUP. Foram utilizadas algumas das peças que estão documentadas neste projecto, tais

como o resolver e o seu veio de transmissão de rotação. A peça de transmissão de potência e os apoios tiveram de ser ligeiramente alterados por forma a ser possível a montagem na estrutura do FIAT Uno.

Este teste que irá ser realizado, vai servir para validar e para se conseguir perceber se não existem erros ao nível do motor, controlador e baterias. Após a realização desta serie de testes o conjunto ficará pronto para a inserção no monolugar.

Nas figuras 74 e 75 pode observar-se o acoplamento do motor elétrico à estrutura do FIAT Uno.

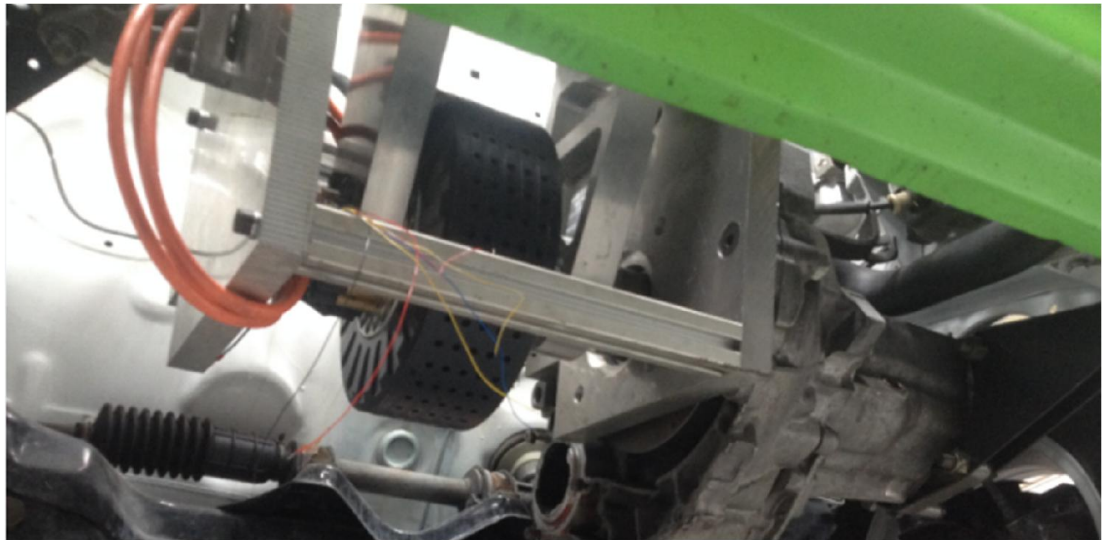


Figura 74 - Vista de baixo da montagem do motor elétrico no FIAT UNO

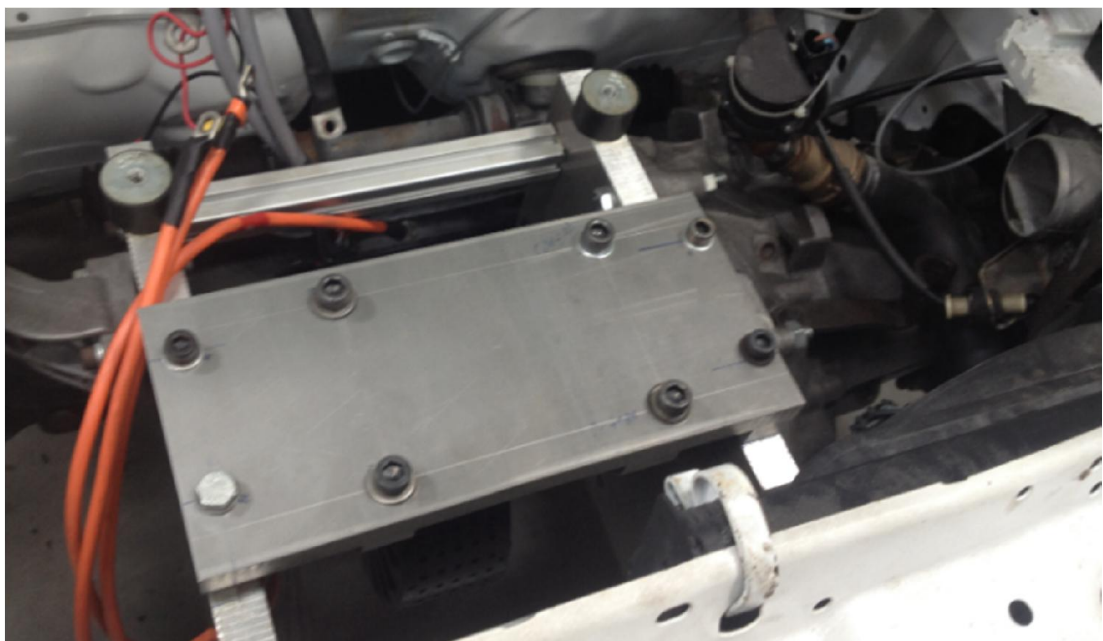


Figura 75 - Vista de cima da montagem do motor elétrico no FIAT UNO

Por forma a se conseguir aproveitar o máximo de potência do motor, utilizando a caixa de velocidades do FIAT Uno 45s, encravada numa só mudança pois ainda não foi desenvolvida o controlo do motor para que seja possível utilizar uma caixa de velocidades, tal como foi explicado no subcapítulo 4.1.1, foram testadas no mesmo *software* de cálculo do fórmula elétrico as diferentes relações de caixa do FIAT Uno. Com este cálculo iterativo foi possível concluir que a melhor mudança a utilizar seria a quinta, este engrenamento consegue dar ao carro uma velocidade máxima aproximada de 140 km/h e 525Nm de binário à roda. Obtendo assim um tempo de aceleração dos 0-100 km/h de 3,11 segundos.

Estes valores, comparativamente com os de origem apresentam uma melhor performance para este veículo, de salientar por exemplo que o tempo de aceleração 0-100 km/h reduz-se em cerca de 6 segundos.

(Página em branco)

Capítulo 9 – Considerações Finais

9.1. Conclusões

Ao longo desta dissertação foi apresentado detalhadamente o processo de dimensionamento, seleção e montagem de um fórmula elétrico.

Começou-se por fazer um estudo teórico dos vários tipos de tecnologias elétricas que poderiam ser implementadas, acabou por se escolher um motor de ímanes permanentes, síncrono e sem escovas e como armazenamento de energia optou-se por baterias de Lítio – Polímero.

A escolha deste motor elétrico recaiu sobre o motor *Emrax 228*, por dois motivos, o primeiro e mais influente foi que este motor já se encontrava em estudo no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Faculdade, e desse modo já eram conhecidas as características e seria mais simples a implementação deste motor no carro pois já existia na faculdade alguns exemplares. O outro motivo para a escolha é que comparativamente a outros motores elétricos, este tem características, a nível de binário e potência que são, inclusive, melhor que alguns motores térmicos.

Para fazer a escolha deste motor fez-se primeiro o estudo do motor térmico e de todas as suas características, desde relações de caixa, as curvas de potência e binário. Para comprovar e complementar o estudo teórico ainda foram realizados testes em pista.

Foi estudado o comportamento teórico do arranque dos 0-100 km/h e da velocidade, tanto do motor térmico como do elétrico, deste estudo conclui-se que o fórmula com o motor elétrico não vai conseguir atingir as mesmas performances, ficando condicionado pela relação de caixa existente e também da limitação a nível das baterias e do controlador, que não permitem fornecer mais de 40 kW de potência.

A escolha das baterias partiu do mesmo princípio que o motor elétrico, a sua existência na faculdade foi o fator mais relevante para a escolha desta tecnologia, mas mais uma vez estas são as que apresentam melhor preço/qualidade do mercado e são as que têm melhor densidade de potência, logo não vão comprometer o correto funcionamento do sistema.

Com a ajuda do *software Optimum Lap* foi possível obter os resultados das curvas de potência e binário para o conjunto do motor elétrico mais controlador. Com estes cálculos finalizados e com o dimensionamento das baterias e do motor concluído, foi modelado e calculado por elementos finitos as peças de suporte e de transmissão de potência. Nestas teve de ser feito um estudo a nível do material e geometrias por forma a cumprirem os requisitos exigidos, de salientar que houve a necessidade de se ter um dos apoios do motor em material polimérico, devido a este estar junto à zona de ligação dos terminais elétricos do motor.

Concluído assim todo o estudo e os testes, algumas das peças modeladas foram produzidas. Por falta de tempo não foi possível fabricar todas as peças, nem executar a montagem do motor elétrico e das baterias no fórmula, devido a esta etapa não ficar cumprida, levou a que não fosse possível testar o carro elétrico em pista, por forma a validar todos os cálculos teóricos.

Em jeito de conclusão, deve afirmar-se que este projeto é de elevada complexidade, existem muitas variáveis a ter conta, tais como a geometria e a volumetria do chassis, a montagem dos packs de baterias e todo o seu controlo eletrónico, e por último os ensaios do motor elétrico e do seu controlador. Ao longo deste projeto todos os esforços foram feitos por parte da equipa de engenheiros do departamento de eletrotecnia, dos orientadores desta dissertação e do próprio autor para que se conseguisse montar o carro, mas surgiram sempre contratempos, desde atrasos a nível da aquisição do material, da conceção das caixas de baterias e também dos ensaios ao motor elétrico. Todas estas variáveis juntas levou a que parte do trabalho inicialmente proposto não conseguisse ser executado a tempo da entrega deste presente relatório do projeto.

9.2. Trabalhos Futuros

Nesta secção propõe-se alguns dos trabalhos futuros que poderão ser executados, por forma a dar continuação a este tão ambicioso projeto.

Primeiramente dever-se-ia concluir o trabalho em falta neste projeto, com as peças já todas modeladas e com o material já encomendado, já só se tem de mandar fabricar as peças. Após isso é concluir a montagem das caixas de baterias, e por último fazer a montagem no fórmula. Posteriormente a montagem do veículo, este deveria ser testado, por forma a validar os cálculos realizados nesta dissertação.

Sugere-se também que futuramente se teste o uso de uma caixa de velocidades acoplada ao motor elétrico, sendo necessário fazer o controlo eletrónico do motor para que este consiga funcionar com as mudanças de velocidades impostas por uma caixa de velocidades.

Poder-se-á também testar a utilização de dois motores, um em cada roda traseira, neste caso ficar-se-ia com mais espaço para baterias, que seria necessário pois ao colocar mais um motor, também será necessário aumentar a potência fornecida pelas baterias, isto pode ser feito aumentando o número de baterias. Esta solução de dois motores elétricos traz grandes vantagens ao carro, pois duplica o binário e a potência, e ainda permite a colocação de um diferencial no fórmula *Glória* B4, neste caso um diferencial eletrónico.

Outro estudo que poderia ser realizado era a possibilidade de integração de travagem regenerativa, possibilitando assim aumentar a autonomia do veículo.

Capítulo 10 - Referências

1. *Emrax 228 Dimensions*. Available from: http://www.enstroj.si/images/stories/emrax_dimensions_2013.jpg.
2. ; Available from: http://www.ucsusa.org/clean_vehicles/why-clean-cars/air-pollution-and-health/cars-trucks-air-pollution.html.
3. *Abastecimento para carros elétricos Mobi.e chega à Noruega*. 01/07/2014]; Available from: <http://www.mobie.pt/o-carregamento>.
4. *Mobi.e*. 30/06/2014]; Available from: <http://www.mobie.pt/o-carregamento>.
5. *WTCC switches to eco-friendly fuel*. 2008 25/06/2014]; Available from: <http://www.autoindustriya.com/racing-news/wtcc-switches-to-eco-friendly-fuel.html>.
6. *Michael Faraday*. 02/06/2014]; Available from: http://pt.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday.
7. *History of Electric Vehicles*. [cited 02/06/2014; The Early Years, Electric Cars from 1830 to 1930]. Available from: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>.
8. Brito F. e Martins J., *Carros Elétricos*. 2011: PUBLINDUSTRIA.
9. *Veículos com Eficiência Energética: Veículos 100% Elétricos*. 25/05/2014]; Available from: <http://www.planetseed.com/pt-br/node/102394>.
10. *Automobilismo*. [cited 23/05/2014; Available from: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Automobilismo>.
11. *HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS*. 29/05/2014]; Available from: <http://www.veiculoselectricospt.com/historia-dos-veiculos-electricos/>.
12. Junior, A.G. *Crise do Petróleo*. [cited 30/05/2014; Available from: http://www.infoescola.com/economia/crise-do-petroleo/http://pt.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Quito.
13. *FIA Alternative Energies Cup*. 20/05/2014]; Available from: <http://www.fia.com/node/1777>.
14. *Energy Recovery Systems (ERS)*. [cited 21/05/2014; Available from: http://www.formula1.com/inside_f1/understanding_f1_racing/8763.html.
15. GENON, L. *RENAULT REVEALS RACE-INTENT 2014 POWER UNIT: THE ENERGY F1-2014*. 2014.
16. Mehrdad Ehsani, Y.G., Sebastien E. Gay, Ali Emadi, *Modern Eletric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 2005.
17. *Densidade de Energia*. [cited 1/06/2014; Available from: http://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade_de_energia.
18. M. Zeraoulia, M.E.H.B., D. Diallo *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*
19. Lopes, F.A.P., *Estudo e Comparação de Diferentes Métodos de Controlo de Motores Síncronos com Ímanes Permanentes* in FEUP. 2008.

20. Irwin, B.M.W.e.J.D., *The Industrial Electronics Handbook: Power electronics and motor drives*. Taylor & Francis Group, 2011 ed.
21. Bizon, N. *Energy efficiency of multiport power converters used in plug-in/v2g fuel cell vehicles*. 2012
22. Soylu, E.b.D.S. *Electric Vehicles - Modelling and Simulations*. 2011.
23. Ramos, T.M.S., *Sistema de tração de um Veículo Elétrico de Competição*. 2011, FEUP.
24. Azevedo, B., 2013, FEUP
25. Pinto, R. 3/06/2014]; Available from: http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Bateria_de_l%C3%ADtio-pol%C3%ADmero.
26. Izadian, P.K.e.A. *Power management strategies for hybrid electric trucks in smart-grids*. 2012.
27. Tan, S.F.T.e.C.W. *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*. 2013.
28. M. Ehsani, Y.G., e A. Emadi *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. 2009.
29. N., R., *O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de eletricidade*. 2008, Instituto Superior Técnico.
30. Hossein Maleki, H.W., Wally Porter, Jerry Hallmark, *Li-Ion polymer cells thermal property changes as a function of cycle-life*. Journal of Power Sources, 2014: p. 223-230.
31. Co.Ltd, Y.M., *Yamaha FZS1000(N) Service Manual*. First Edition ed. 2000.
32. Cars, G., *Gloria B 4-10 Y Service Manual*.
33. [cited 27/05/2014; Available from: <http://www.enstroj.si/Electric-products/emrax-228-motorsgen.html>.
34. *GP Portugal Motociclismo 2011*. 30/05/2014]; Available from: http://fitadeasfalto.blogspot.pt/2011_04_01_archive.html.
35. General Electronics Battery Co, L., *Specifications of GEB Lithium Batteries*.

Capítulo 11 - Anexos

11.1. Anexo 1 – Folha de cálculo motor a combustão

Perim. roda	1,71	m
raio	0,273	m
jante	13	poleg.
perfil pneu	50	%
largura	215	mm

$$\text{Pot} = \text{bin} * \text{rpm}$$

$$\eta = 0,85$$

redução primária		1,581	Caixa * Primaria	Caixa * Primária * Secundária
caixa	1ª	2,5	3,95	10,0
	2ª	1,842	4,61	7,3
	3ª	1,5	2,76	6,0
	4ª	1,333	2,00	5,3
	5ª	1,2	1,60	4,8
	6ª	1,115	1,34	4,4
redução secundária		2,52		

Binario de arranque:	$F = m * a$	
tempo de acel 0-100km/h=	3,11	s
m=	480	kg
F=	1492,8	N
Binario=F*raio	406,94	N.m

1ª velocidade

redução

9,98

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	300,74	8,59	30,91	575,68
4000	51	90	37,51	400,99	11,45	41,21	759,30
5000	67	93	49,28	501,24	14,31	51,51	798,00
6000	89	104	65,46	601,48	17,17	61,81	883,36
7000	105	108	77,23	701,73	20,03	72,12	893,29
7500	110	103	80,90	751,85	21,46	77,27	873,44
8000	115	103	84,58	801,98	22,89	82,42	856,07
8500	122	101	89,73	852,10	24,32	87,57	854,75
9000	129	100	94,88	902,22	25,76	92,72	853,59
9250	131	100	96,35	927,29	26,47	95,30	843,39
9500	133	98	97,82	952,35	27,19	97,87	833,74
9750	136	98	100,03	977,41	27,90	100,45	830,68
10000	137	96	100,76	1002,47	28,62	103,02	815,87
10250	139	96	102,23	1027,53	29,33	105,60	807,59
10500	140	94	102,97	1052,59	30,05	108,17	794,03
10750	138	90	101,50	1077,66	30,76	110,75	764,49
11000	137	87	100,76	1102,72	31,48	113,32	741,70
11500	133	81	97,82	1152,84	32,91	118,47	688,74

2ª velocidade

redução

7,35

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	408,17	11,65	41,95	424,16
4000	51	90	37,51	544,23	15,54	55,93	559,45
5000	67	93	49,28	680,29	19,42	69,91	587,97
6000	89	104	65,46	816,34	23,30	83,89	650,86
7000	105	108	77,23	952,40	27,19	97,88	658,18
7500	110	103	80,90	1020,43	29,13	104,87	643,55
8000	115	103	84,58	1088,46	31,07	111,86	630,75
8500	122	101	89,73	1156,49	33,01	118,85	629,78
9000	129	100	94,88	1224,52	34,96	125,84	628,92
9250	131	100	96,35	1258,53	35,93	129,34	621,41
9500	133	98	97,82	1292,54	36,90	132,83	614,30
9750	136	98	100,03	1326,56	37,87	136,33	612,05
10000	137	96	100,76	1360,57	38,84	139,82	601,13
10250	139	96	102,23	1394,59	39,81	143,32	595,03
10500	140	94	102,97	1428,60	40,78	146,81	585,04
10750	138	90	101,50	1462,62	41,75	150,31	563,28
11000	137	87	100,76	1496,63	42,72	153,81	546,48
11500	133	81	97,82	1564,66	44,67	160,80	507,46

3ª velocidade

redução

5,99

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	501,24	14,31	51,51	345,41
4000	51	90	37,51	668,31	19,08	68,68	455,58
5000	67	93	49,28	835,39	23,85	85,85	478,80
6000	89	104	65,46	1002,47	28,62	103,02	530,02
7000	105	108	77,23	1169,55	33,39	120,19	535,97
7500	110	103	80,90	1253,09	35,77	128,78	524,06
8000	115	103	84,58	1336,63	38,16	137,36	513,64
8500	122	101	89,73	1420,17	40,54	145,95	512,85
9000	129	100	94,88	1503,71	42,93	154,53	512,15
9250	131	100	96,35	1545,48	44,12	158,83	506,04
9500	133	98	97,82	1587,24	45,31	163,12	500,24
9750	136	98	100,03	1629,01	46,50	167,41	498,41
10000	137	96	100,76	1670,78	47,70	171,70	489,52
10250	139	96	102,23	1712,55	48,89	176,00	484,55
10500	140	94	102,97	1754,32	50,08	180,29	476,42
10750	138	90	101,50	1796,09	51,27	184,58	458,69
11000	137	87	100,76	1837,86	52,46	188,87	445,02
11500	133	81	97,82	1921,40	54,85	197,46	413,24

4ª velocidade

redução

5,32

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	564,03	16,10	57,96	306,95
4000	51	90	37,51	752,04	21,47	77,29	404,86
5000	67	93	49,28	940,05	26,84	96,61	425,50
6000	89	104	65,46	1128,06	32,20	115,93	471,01
7000	105	108	77,23	1316,07	37,57	135,25	476,30
7500	110	103	80,90	1410,08	40,25	144,91	465,72
8000	115	103	84,58	1504,08	42,94	154,57	456,46
8500	122	101	89,73	1598,09	45,62	164,23	455,76
9000	129	100	94,88	1692,09	48,30	173,89	455,13
9250	131	100	96,35	1739,09	49,65	178,72	449,70
9500	133	98	97,82	1786,10	50,99	183,55	444,55
9750	136	98	100,03	1833,10	52,33	188,38	442,92
10000	137	96	100,76	1880,10	53,67	193,21	435,02
10250	139	96	102,23	1927,10	55,01	198,04	430,61
10500	140	94	102,97	1974,11	56,35	202,87	423,38
10750	138	90	101,50	2021,11	57,70	207,70	407,63
11000	137	87	100,76	2068,11	59,04	212,54	395,47
11500	133	81	97,82	2162,12	61,72	222,20	367,24

5ª velocidade

redução

4,79

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	626,54	17,89	64,39	276,32
4000	51	90	37,51	835,39	23,85	85,85	364,46
5000	67	93	49,28	1044,24	29,81	107,31	383,04
6000	89	104	65,46	1253,09	35,77	128,78	424,01
7000	105	108	77,23	1461,94	41,73	150,24	428,78
7500	110	103	80,90	1566,36	44,71	160,97	419,25
8000	115	103	84,58	1670,78	47,70	171,70	410,91
8500	122	101	89,73	1775,21	50,68	182,43	410,28
9000	129	100	94,88	1879,63	53,66	193,17	409,72
9250	131	100	96,35	1931,84	55,15	198,53	404,83
9500	133	98	97,82	1984,06	56,64	203,90	400,19
9750	136	98	100,03	2036,27	58,13	209,26	398,73
10000	137	96	100,76	2088,48	59,62	214,63	391,62
10250	139	96	102,23	2140,69	61,11	219,99	387,64
10500	140	94	102,97	2192,90	62,60	225,36	381,14
10750	138	90	101,50	2245,12	64,09	230,73	366,95
11000	137	87	100,76	2297,33	65,58	236,09	356,02
11500	133	81	97,82	2401,75	68,56	246,82	330,59

6ª velocidade

redução

4,45

rpm	Pot (cv)	Bin (Nm)	Pot(kW)	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
3000	29	66	21,33	674,31	19,25	69,30	256,75
4000	51	90	37,51	899,08	25,67	92,40	338,65
5000	67	93	49,28	1123,85	32,08	115,50	355,91
6000	89	104	65,46	1348,61	38,50	138,59	393,98
7000	105	108	77,23	1573,38	44,91	161,69	398,41
7500	110	103	80,90	1685,77	48,12	173,24	389,55
8000	115	103	84,58	1798,15	51,33	184,79	381,81
8500	122	101	89,73	1910,54	54,54	196,34	381,22
9000	129	100	94,88	2022,92	57,75	207,89	380,70
9250	131	100	96,35	2079,11	59,35	213,67	376,15
9500	133	98	97,82	2135,31	60,96	219,44	371,85
9750	136	98	100,03	2191,50	62,56	225,22	370,48
10000	137	96	100,76	2247,69	64,16	230,99	363,88
10250	139	96	102,23	2303,88	65,77	236,77	360,19
10500	140	94	102,97	2360,08	67,37	242,54	354,14
10750	138	90	101,50	2416,27	68,98	248,31	340,96
11000	137	87	100,76	2472,46	70,58	254,09	330,80
11500	133	81	97,82	2584,85	73,79	265,64	307,18

11.2. Anexo 2 – Folha de cálculo binário de arranque

Dados:	
Massa (kg)	460,00
g (m/s ²)	9,81
Crr	0,02
Inclinação (%)	5%
Área frontal (m ²)	
Velocidade (Km/h)	10,00
Velocidade (m/s)	2,78

Propriedades do ar:		
$F_v = \frac{(\rho \times C_d \times A_f \times v^2)}{2}$	Densidade (kg/m ³)	1,204
	Cx (Cd*Af)	0,48

Razões de transferência		
usando apenas a 1ª velocidade	Total	9,975
Motor eléctrico	relação unica	0,000
Roda:		
Diâmetro jante (polegadas)	13	
Pneu (%)	50	
Pneu, largura (mm)	215,000	
Raio (m)	0,273	
Perimetro (m)	1,713	

Coefficiente de segurança	1,10	10,00%
----------------------------------	------	--------

vi (m/s)	0
vf (m/s)	2,78
t1 (s)	0
t2 (s)	0,9
a (m/s ²)	3,09

$$F = m \times a$$

$$F = M \times g \times \sin \alpha$$

$$F_a = C_{rr} \times M \times g \times \cos \alpha$$

$$F_{total} = F + F_a + F_v$$

F1(N)	1420
Força (N)	225
Força atrito (N)	68
Resistência do ar (N)	2
Angulo (º)	2,86

Na roda:	
Potência(kW)	4,76
rpm	97,31
Binário (N.m)	514,24
Motor	
Binário (N.m)	51,55

Força total (N)	1715
-----------------	------

(Página em branco)

11.3. Anexo 3 – Tabela motores elétricos

Estudo de Motores Eléctricos disponíveis no mercado					
MODELOS	CARACTERÍSTICAS				
	Potência contínua (kW)	Potência máx(kW)	Binário contínuo (Nm)	Binário máx (Nm)	Rotações máx (rpm)
<i>Motor Térmico</i>		107 kW		106 Nm	10000 rpm
YASA-250	65 kW	90kW (350V) , 180kW (700V)	160 Nm	250 Nm	9000 rpm
YASA-400	85 kW	90kW (350V) , 180kW (700V)	250 Nm	400 Nm	7500 rpm
YASA-750	75 kW	100kW (350V), 200kW (700V)	400 Nm	800 Nm	4000 rpm
EMRAX 200	85 kW	65 kW	70 kW	120 Nm	6000 rpm
EMRAX 228	50 kW	100 kW	125 kW	240 Nm	4000 rpm
BRUSA IPM1-6.17.04 (400V)	31 kW	56 kW	40 kW	72 kW	10000 rpm
BRUSA ASM1-6.17.12 (400V)	50 kW	107 kW	100 Nm	275 Nm	11000 rpm
BRUSA ASM1-8.24.10 (400V)	41 kW	87 Kw	180 Nm	540 Nm	6000 rpm
BRUSA HSM1-6.17.12 (com DMC524) (400V)	70 kW	96 kW	130 Nm	220 Nm	12000 rpm
BRUSA HSM1-6.17.12 (com DMC534) (400V)	70 kW	120 kW	130 Nm	320 Nm	12000 rpm
BRUSA HSM1-10.18.04 (400V)	28 kW	51 kW	52 Nm	105 Nm	13000 rpm
BRUSA HSM1-10.18.13 (com DMC534) (400V)	93 kW	156 kW	165 Nm	305 Nm	13000 rpm
BRUSA HSM1-10.18.13 (com DMC544) (400V)	93 kW	185 kW	165 Nm	385 Nm	13000 rpm
BRUSA HSM1-10.18.13-Co (400V)	90 kW	187 kW	185 Nm	495 Nm	12000 rpm
BRUSA SSM1-6.17.12 (400V)	60 kW	160 kW	110 Nm	340 Nm	4500 rpm
BRUSA HSM1-10.18.13-HV (750V)	86 kW	146 Kw	165 Nm	305 Nm	4900 rpm
Siemens 1PV5135-WS28 (900V)	67 kW	150 kW	160 Nm	360Nm@250A, 430Nm@300A	3500 rpm
Siemens 1PV5135-WS14 (900V)	61 kW	150 kW	160 Nm	370 Nm	3500 rpm
Siemens 1PV5135-WS18 (900V)	61 kW	150 kW	160 Nm	370 Nm	3500 rpm
Siemens 1PV5135-WS24	61 kW	150 kW	160 Nm	370 Nm	3500 rpm
AMK DT7-40-20-RxO-2000	3 kW	?	29 Nm	210 Nm	2000 rpm
AMK DT10-54-20-RxO-1500	2,8 kW	?	55 Nm	150 Nm	2500 rpm
AMK DT10-95-20-RxO-700	3,4 kW	?	95 Nm	310 Nm	1000 rpm
AMK DS13-190-6-ExF-2600	31,5 kW	?	170 Nm	650 Nm	3000 rpm
AMK DS13-250-6-ExW-2600	48 kW	?	260 Nm	650 Nm	3000 rpm
AMK DH16-240-4-lxF-1500	36 Kw	?	230 Nm	?	4500 rpm
AMK SKT13-250-20-xxW-2600	58 kW	?	310 Nm	805 Nm	3300 rpm
AMK SKT13-450-20-xxW-1200	47 kW	?	450 Nm	1290 Nm	2000 rpm
AMK DT10-95-20-RxO-700	3,4 kW	?	95 Nm	310 Nm	1000 rpm
AMK DS13-190-6-ExF-2600	31,5 kW	?	170 Nm	650 Nm	3000 rpm
AMK DS13-250-6-ExW-2600	48 kW	?	260 Nm	650 Nm	3000 rpm
AMK DH16-240-4-lxF-1500	36 Kw	?	230 Nm	?	4500 rpm
AMK SKT13-250-20-xxW-2600	58 kW	?	310 Nm	805 Nm	3300 rpm
AMK SKT13-450-20-xxW-1200	47 kW	?	450 Nm	1290 Nm	2000 rpm

(Página em branco)

11.4. Anexo 4 – Folha de cálculo motor elétrico

redução	2,35
---------	------

rpm	rotações (rad/s)	Pot (cv)	Pot (cv) c/perdas	Bin (Nm)	Pot(kW)	Pot (kW) c/perdas	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
200	20,94	6,88	61,64	240,00	5,06	45,34	85,11	2,43	8,75	539,37
400	41,89	13,76	123,28	240,00	10,12	90,67	170,21	4,86	17,49	539,37
600	62,83	20,64	184,92	240,00	15,18	136,01	255,32	7,29	26,24	539,37
800	83,78	27,52	246,56	240,00	20,24	181,34	340,43	9,72	34,98	539,37
1000	104,72	34,40	308,20	240,00	25,3	226,68	425,53	12,15	43,73	539,37
1200	125,66	41,28	369,84	240,00	30,36	272,02	510,64	14,58	52,48	539,37
1400	146,61	48,16	431,48	240,00	35,42	317,35	595,74	17,01	61,22	539,37
1600	167,55	54,38	487,27	238,73	40	358,39	680,85	19,44	69,97	532,97
1800	188,50	54,38	487,27	212,21	40	358,39	765,96	21,87	78,72	473,75
2000	209,44	54,38	487,27	190,99	40	358,39	851,06	24,29	87,46	426,38
2200	230,38	54,38	487,27	173,62	40,00	358,39	936,17	26,72	96,21	387,61
2400	251,33	54,38	487,27	159,15	40	358,39	1021,28	29,15	104,95	355,31
2600	272,27	54,38	487,27	146,91	40,00	358,39	1106,38	31,58	113,70	327,98
2800	293,22	54,38	487,27	136,42	40	358,39	1191,49	34,01	122,45	304,55
3000	314,16	54,38	487,27	127,32	40	358,39	1276,60	36,44	131,19	284,25
3200	335,10	54,38	487,27	119,37	40,00	358,39	1361,70	38,87	139,94	266,49
3400	356,05	54,38	487,27	112,34	40,00	358,39	1446,81	41,30	148,69	250,81
3600	376,99	54,38	487,27	106,10	40,00	358,39	1531,91	43,73	157,43	236,88
3800	397,94	54,38	487,27	100,52	40,00	358,39	1617,02	46,16	166,18	224,41
4000	418,88	54,38	487,27	95,49	40,00	358,39	1702,13	48,59	174,92	213,19

a=bin/(raioxmassa) t=(V-V0)/a t=vel/accel			
rpm	a [m/s^2]	t(s)	Σt [s]
200	4,30	0,49	0,49
400	4,30	0,56	1,05
600	4,30	0,56	1,62
800	4,30	0,56	2,18
1000	4,30	0,56	2,75
1200	4,30	0,56	3,31
1400	4,30	0,56	3,88
1600	4,25	0,57	4,45
1800	3,78	0,64	5,09
2000	3,40	0,71	5,81
2200	3,09	0,79	6,59
2400	2,83	0,86	7,45
2600	2,62	0,93	8,38
2800	2,43	1,00	9,38
3000	2,27	1,07	10,45
3200	2,13	1,14	11,60
3400	2,00	1,21	12,81
3600	1,89	1,29	14,10
3800	1,79	1,36	15,45
4000	1,70	1,43	16,88

redução	1,65
---------	------

rpm	rotações (rad/s)	Pot (cv)	Pot (cv) c\perdas	Bin (Nm)	Pot(kW)	Pot (kW) c\perdas	nfinal [rpm]	v à roda [m/s]	v à roda [km/h]	Bin roda (Nm)
200	20,94	6,88	9,35	240,00	5,06	45,34	121,21	3,46	12,46	378,70
400	41,89	13,76	18,71	240,00	10,12	90,67	242,42	6,92	24,91	378,70
600	62,83	20,64	28,06	240,00	15,18	136,01	363,64	10,38	37,37	378,70
800	83,78	27,52	37,42	240,00	20,24	181,34	484,85	13,84	49,83	378,70
1000	104,72	34,40	46,77	240,00	25,3	226,68	606,06	17,30	62,28	378,70
1200	125,66	41,28	56,12	240,00	30,36	272,02	727,27	20,76	74,74	378,70
1400	146,61	48,16	65,48	240,00	35,42	317,35	848,48	24,22	87,20	378,70
1600	167,55	54,38	73,94	238,73	40	358,39	969,70	27,68	99,65	374,21
1800	188,50	54,38	73,94	212,21	40	358,39	1090,91	31,14	112,11	332,63
2000	209,44	54,38	73,94	190,99	40	358,39	1212,12	34,60	124,57	299,37
2200	230,38	54,38	73,94	173,62	40	358,39	1333,33	38,06	137,02	272,15
2400	251,33	54,38	73,94	159,15	40	358,39	1454,55	41,52	149,48	249,48
2600	272,27	54,38	73,94	146,91	40	358,39	1575,76	44,98	161,94	230,28
2800	293,22	54,38	73,94	136,42	40	358,39	1696,97	48,44	174,39	213,84
3000	314,16	54,38	73,94	127,32	40	358,39	1818,18	51,90	186,85	199,58
3200	335,10	54,38	73,94	119,37	40	358,39	1939,39	55,36	199,31	187,11
3400	356,05	54,38	73,94	112,34	40	358,39	2060,61	58,82	211,76	176,10
3600	376,99	54,38	73,94	106,10	40	358,39	2181,82	62,28	224,22	166,32
3800	397,94	54,38	73,94	100,52	40	358,39	2303,03	65,74	236,68	157,56
4000	418,88	54,38	73,94	95,49	40	358,39	2424,24	69,20	249,13	149,69

$$a = \text{bin}/(\text{raio} \times \text{massa}) \quad t = (V - V_0)/a \quad t_{\Sigma} = \text{vel}/\text{acel}$$

rpm	a [m/s^2]	t(s)	Σt [s]
200	3,02	1,15	1,15
400	3,02	4,12	2,29
600	3,02	4,12	3,44
800	3,02	4,12	4,58
1000	3,02	4,12	5,73
1200	3,02	4,12	6,87
1400	3,02	4,12	8,02
1600	2,98	4,17	9,28
1800	2,65	4,70	11,74
2000	2,39	5,22	14,49
2200	2,17	5,74	17,54
2400	1,99	6,26	20,87
2600	1,84	6,78	24,49
2800	1,71	7,30	28,41
3000	1,59	7,83	32,61
3200	1,49	8,35	37,10
3400	1,40	8,87	41,89
3600	1,33	9,39	46,96
3800	1,26	9,91	52,32
4000	1,19	10,44	57,97









11.5. Anexo 5 – Relatório Optimum Lap – Motor térmico

(Página em branco)




Gloria B4 (Gasolina)

1 de julho de 2014

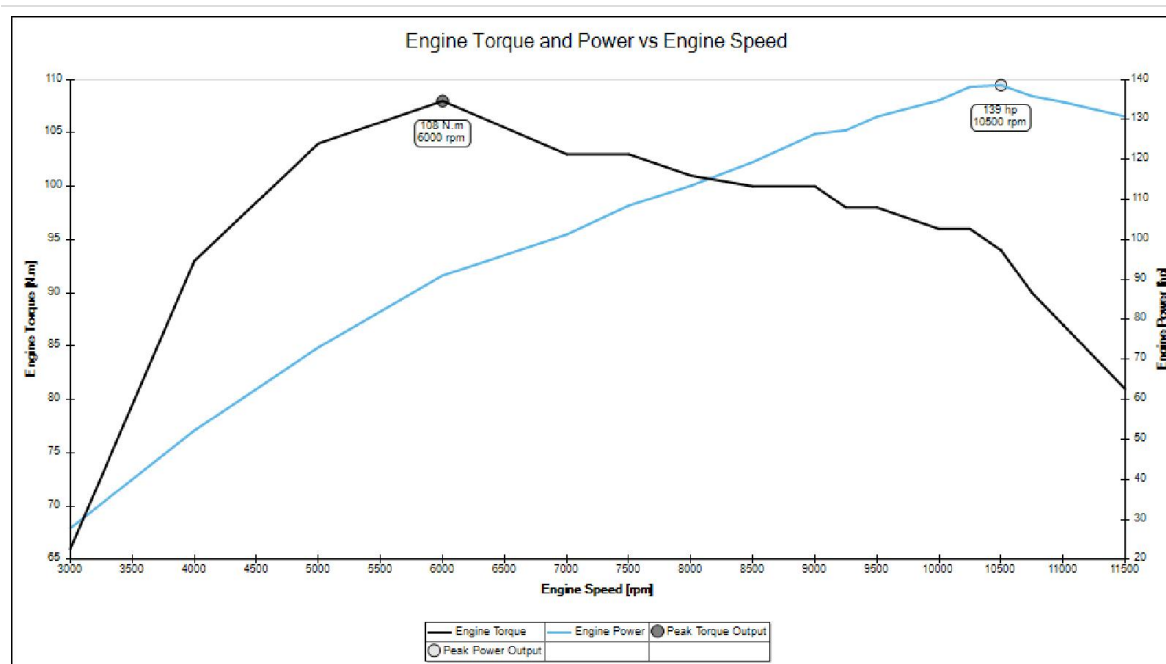
Vehicle Configuration

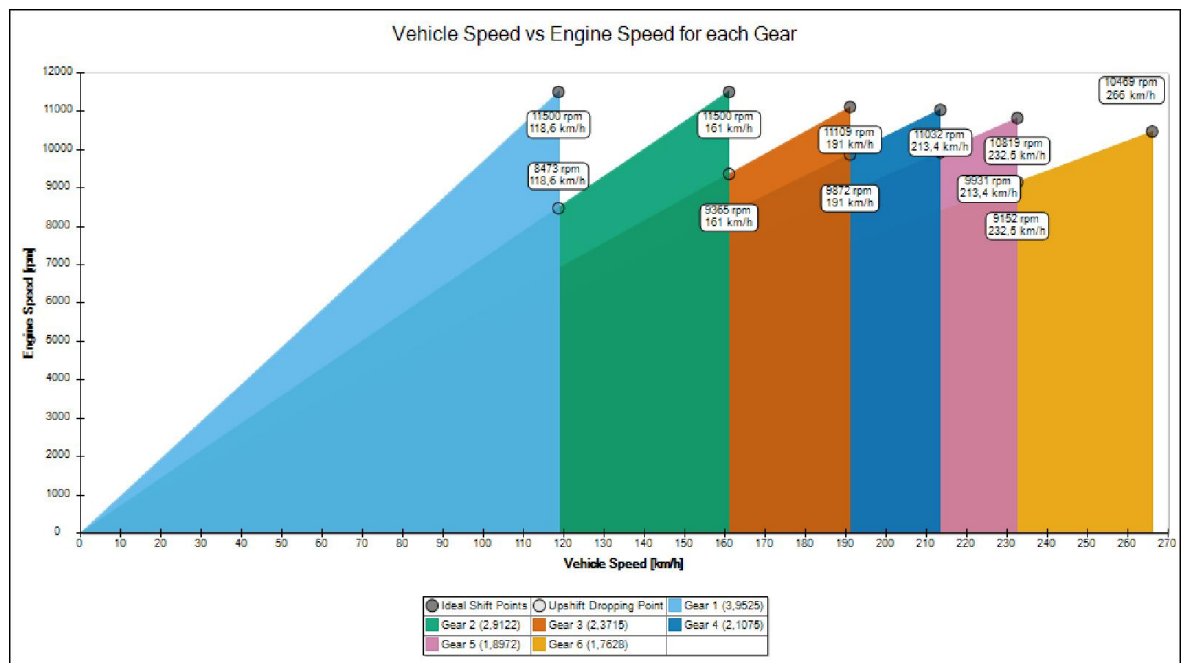
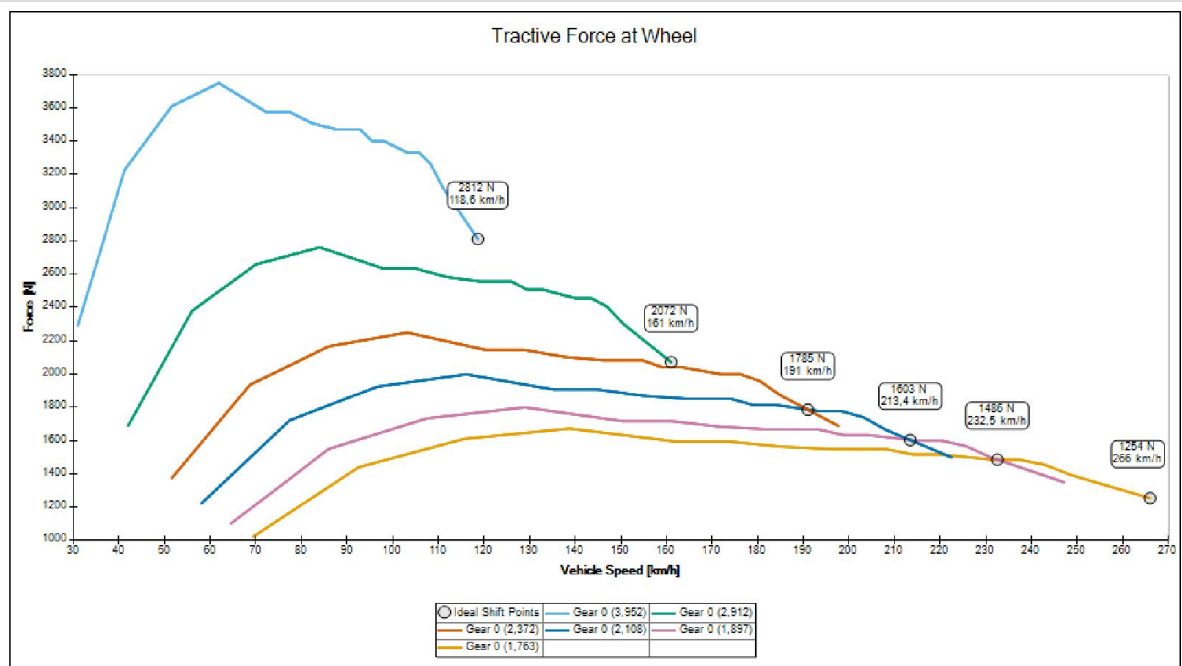
	Parameter	Value
	Total Mass	460 kg
	Max Torque	108 N.m @ 6000 rpm
	Type of Fuel	Gasoline
	Type of Transmission	Sequential Gearbox
	Max Power	138,61 hp @ 10500 rpm
	Power Mass Ratio	0,3 hp/kg
	Downforce @ 100 km/h	-5,65 N
	Drag @ 100 km/h	361,14 N

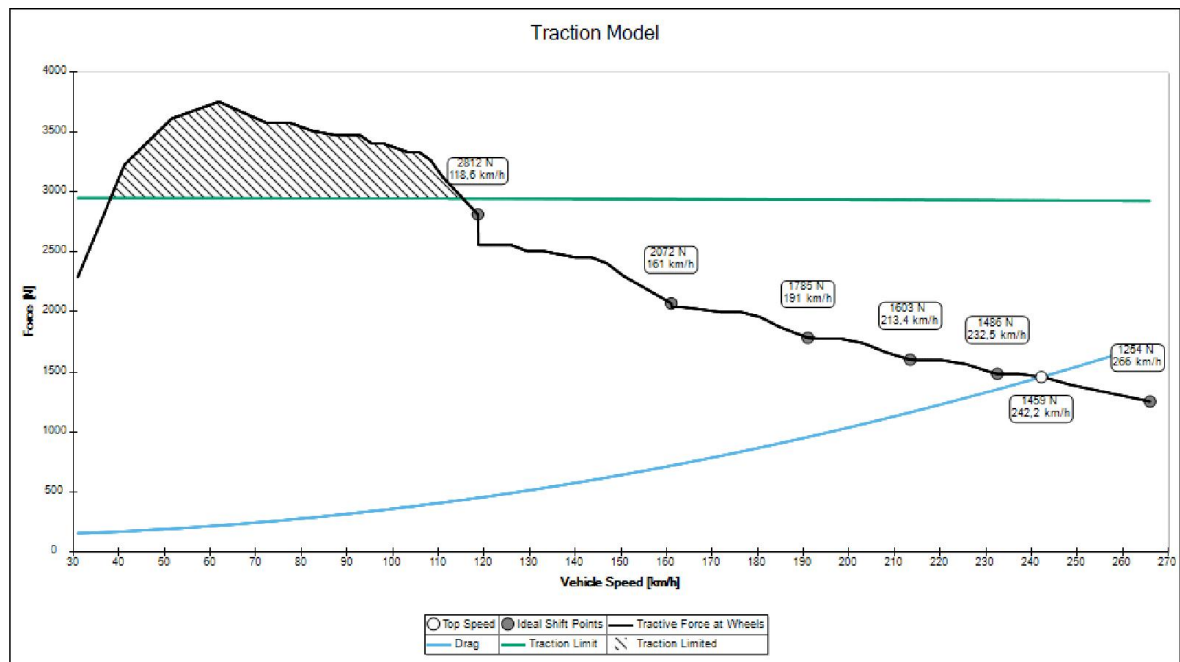
Performance Metrics

	Metric	Value
	Top Speed	242,16 km/h
	Time for 0 to 100 km/h	3,31 s
	Time for 100 to 0 km/h	2,1 s
	Lateral Acceleration - Skidpad 50 m	12,6 m/s^2

Charts Summary







Enter your comments here...









11.7. Anexo 7 - Relatório Optimum Lap – Motor elétrico

(Página em branco)

Gloria B4 (EMRAX 228) (Sem Caixa)

1 de julho de 2014

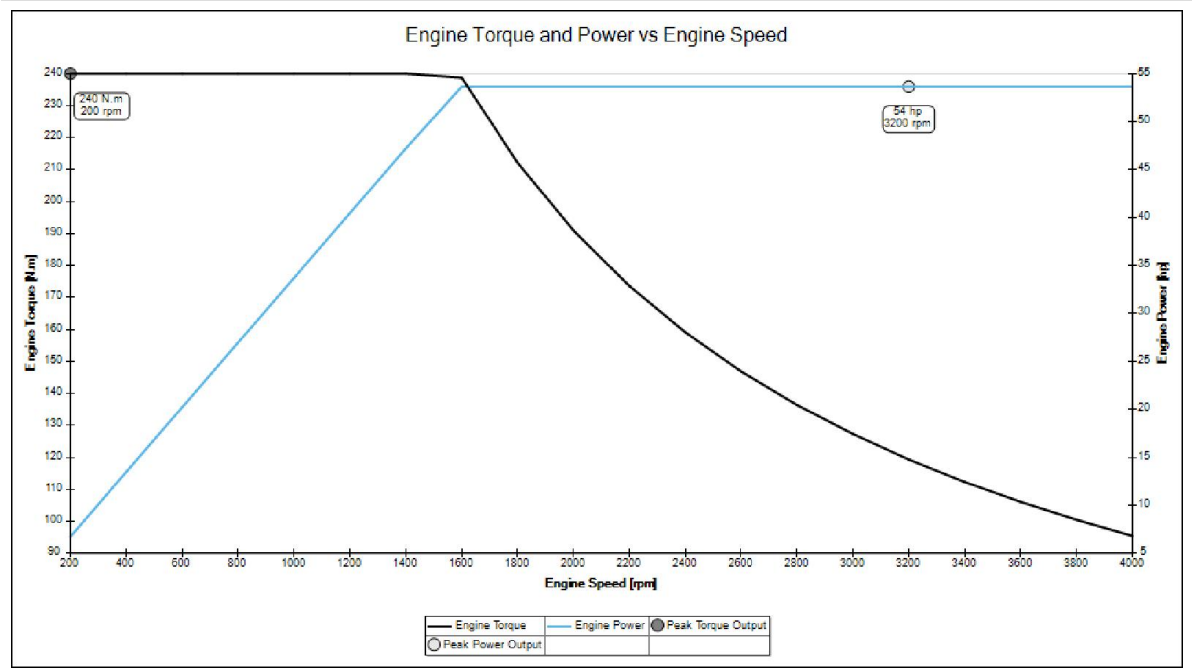
Vehicle Configuration

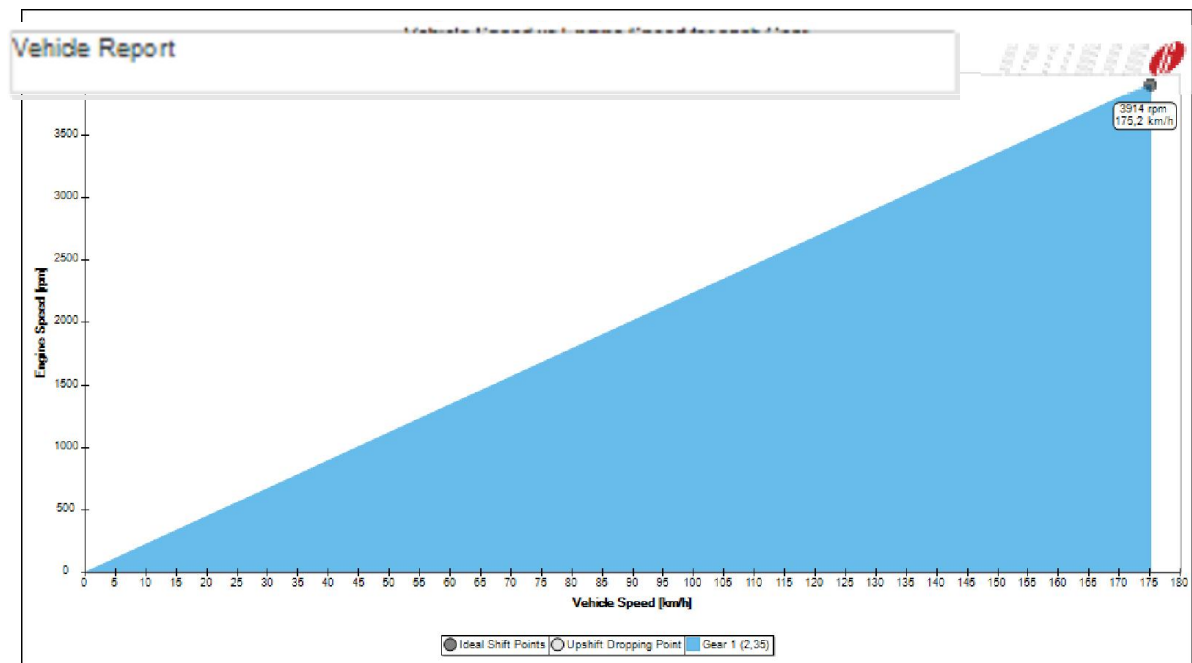
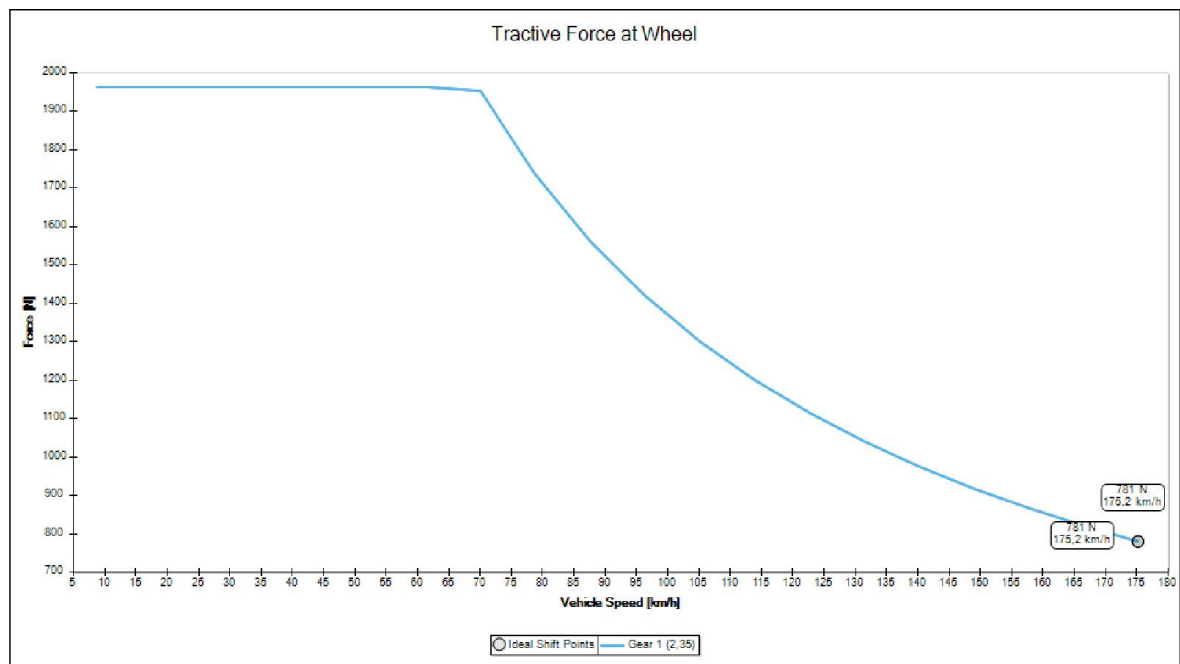
	Parameter	Value
	Total Mass	460 kg
	Max Torque	240 N.m @ 200 rpm
	Type of Fuel	Lithiumlon
	Type of Transmission	Sequential Gearbox
	Max Power	53,64 hp @ 3200 rpm
	Power Mass Ratio	0,12 hp/kg
	Downforce @ 100 km/h	-5,65 N
	Drag @ 100 km/h	361,14 N

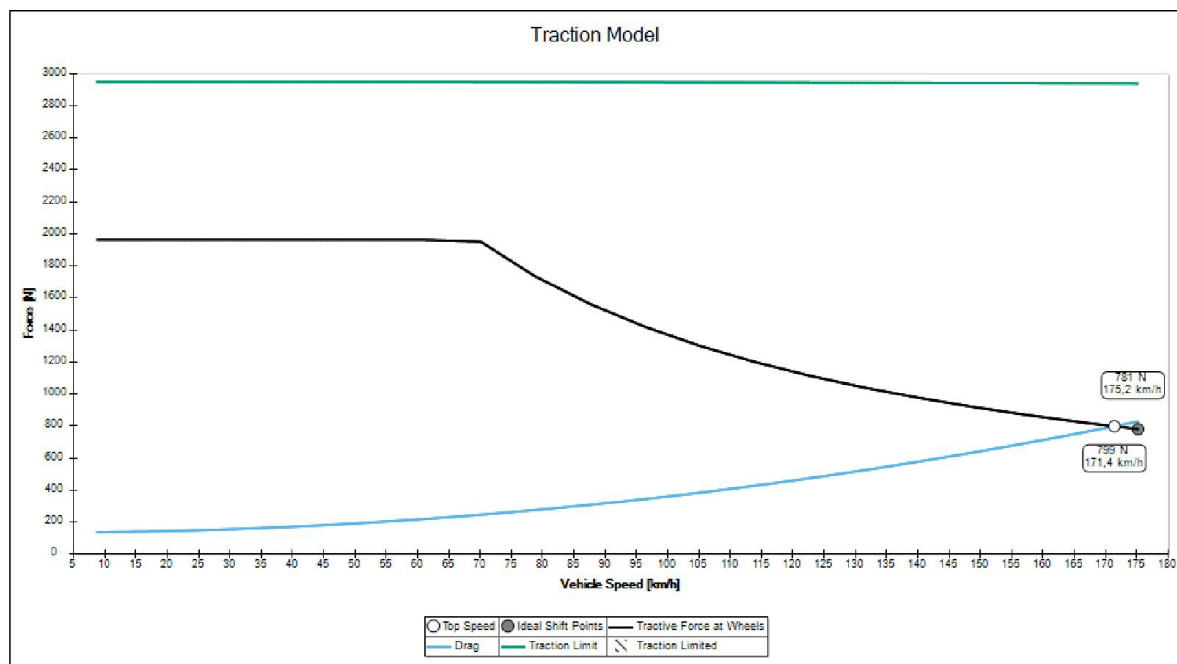
Performance Metrics

	Metric	Value
	Top Speed	171,4 km/h
	Time for 0 to 100 km/h	7,34 s
	Time for 100 to 0 km/h	2,1 s
	Lateral Acceleration - Skidpad 50 m	12,6 m/s^2

Charts Summary



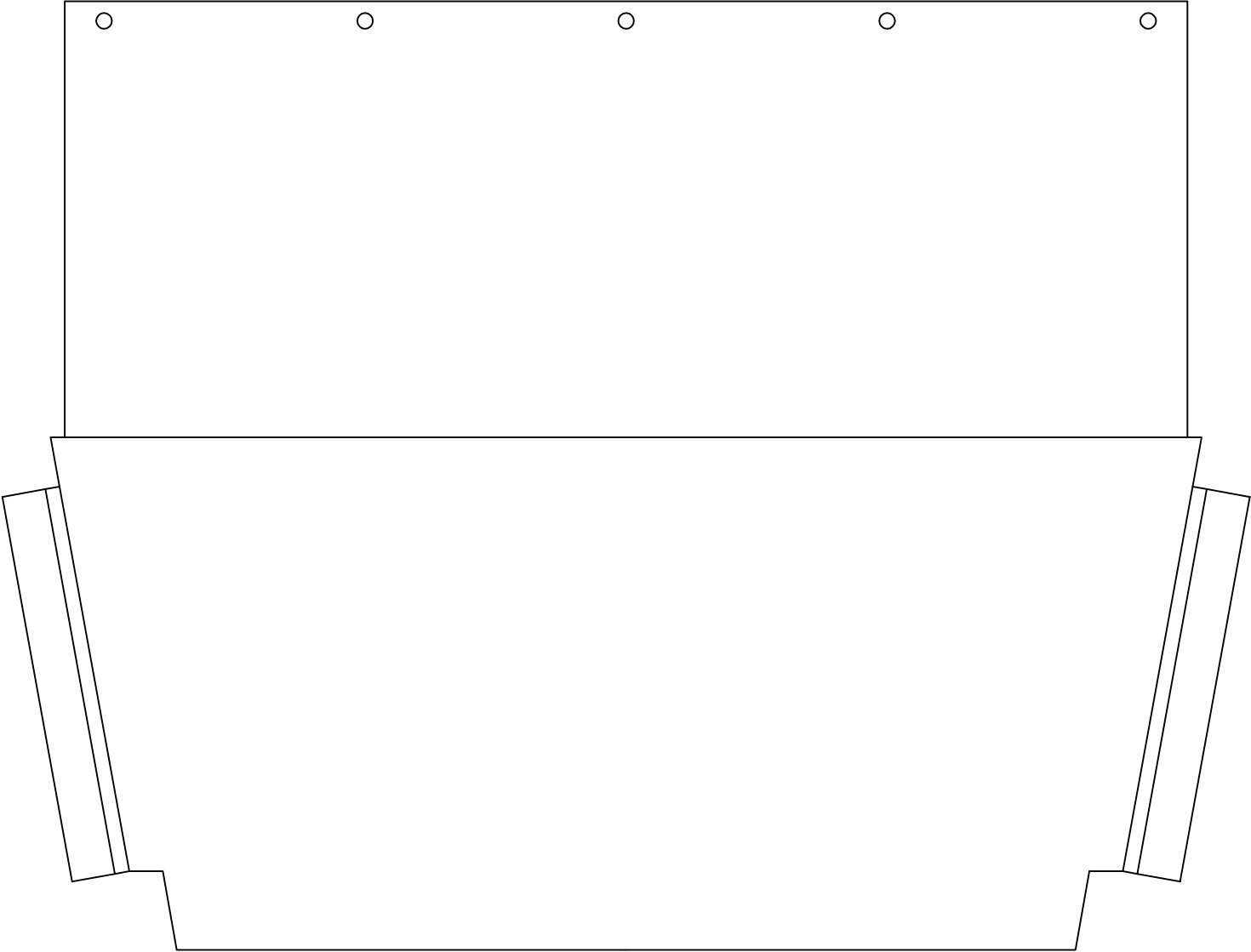


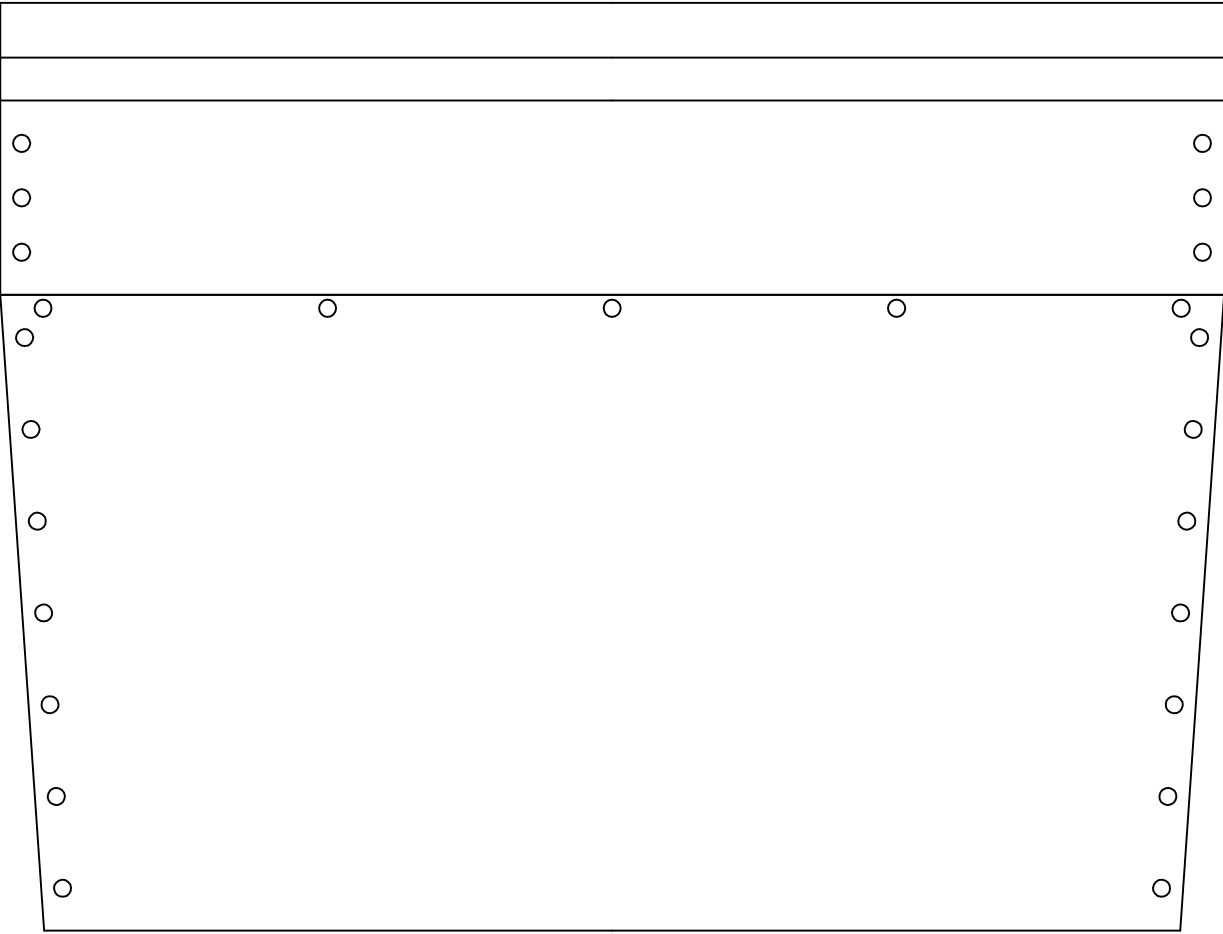


Enter your comments here...

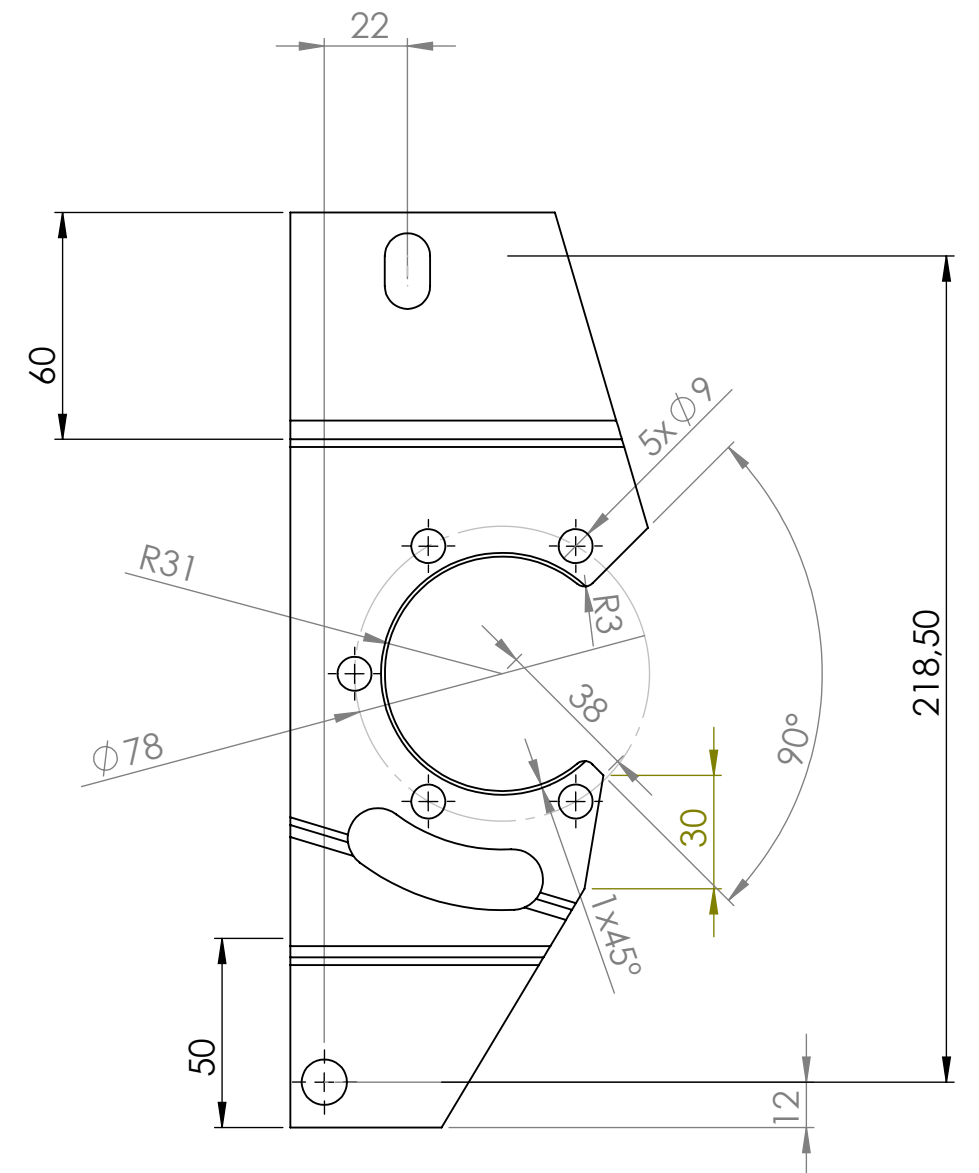
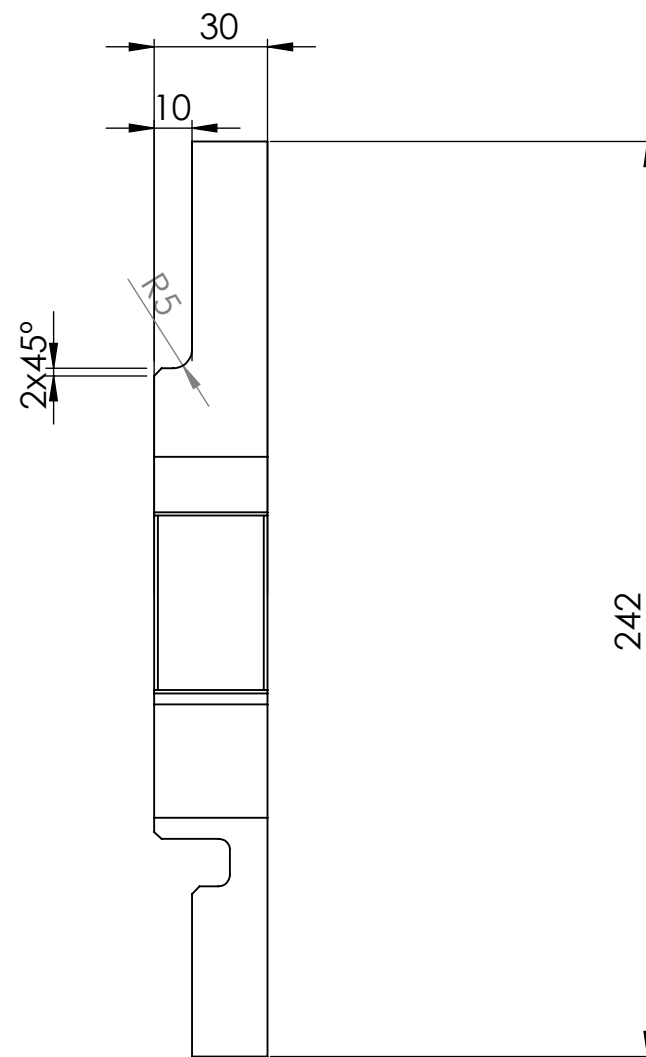
11.9. Anexo 9 – Desenhos definição

(Página em branco)

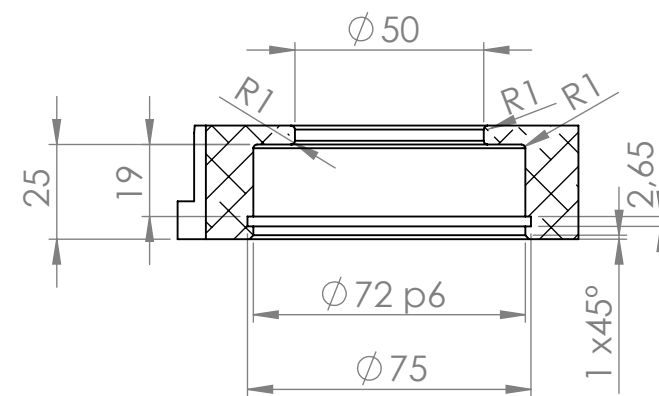
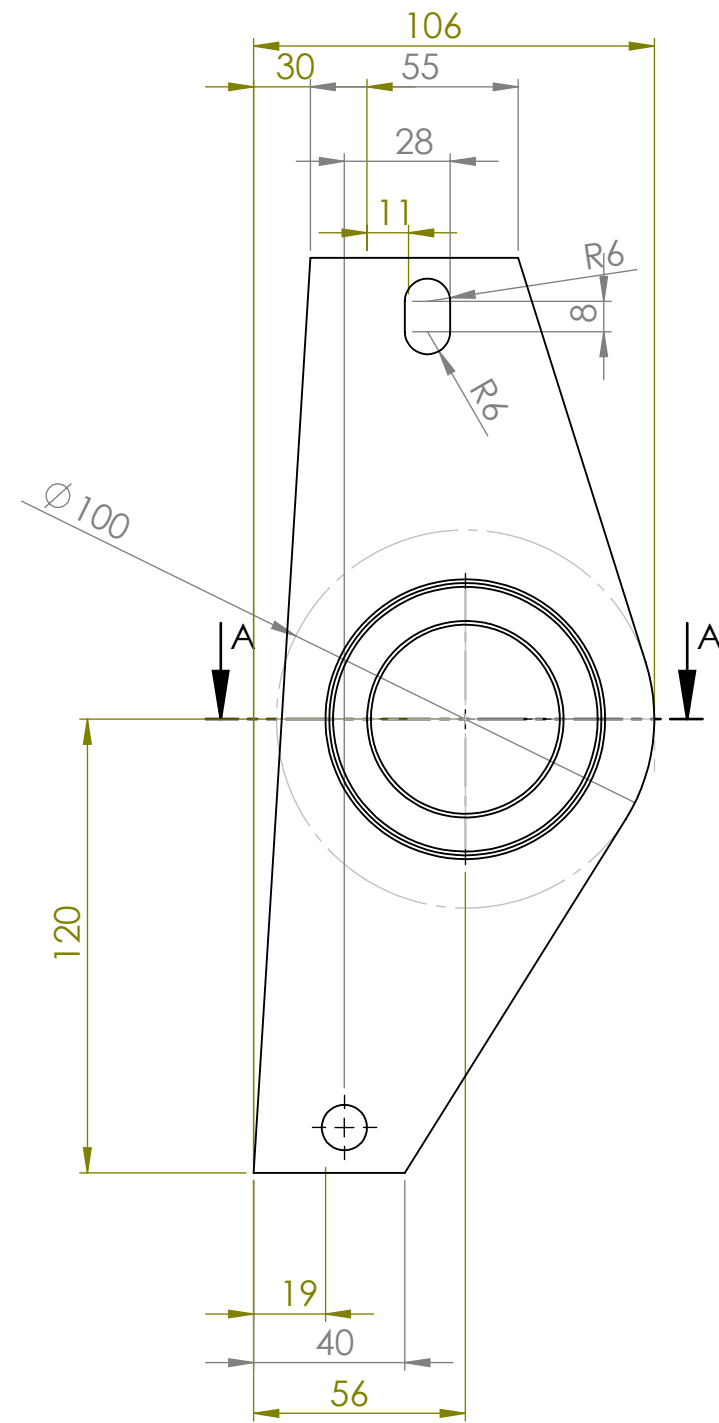
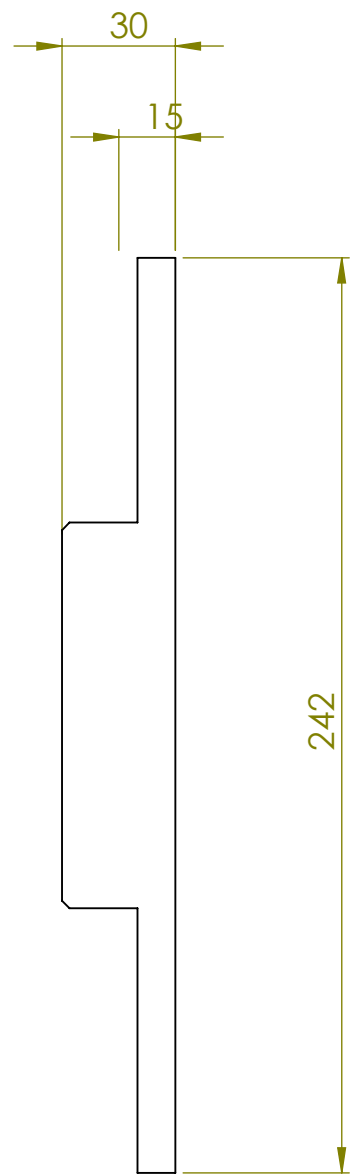




<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div>	<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div>
<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div>	<div><div><div></div><div></div><div></div><div></div></div></div>

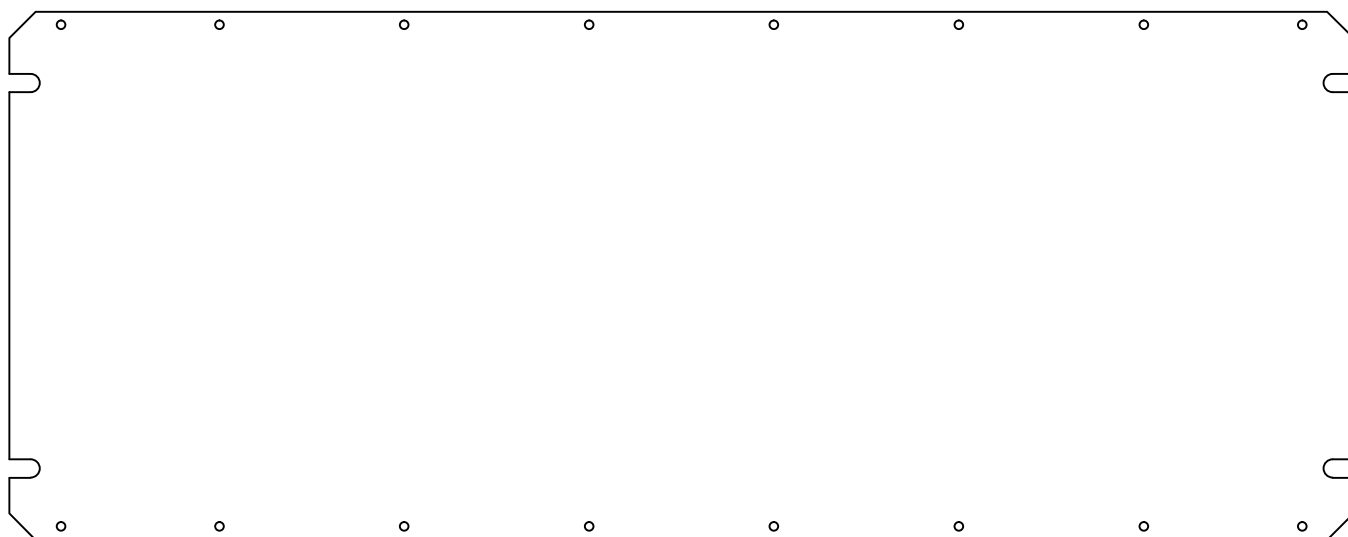


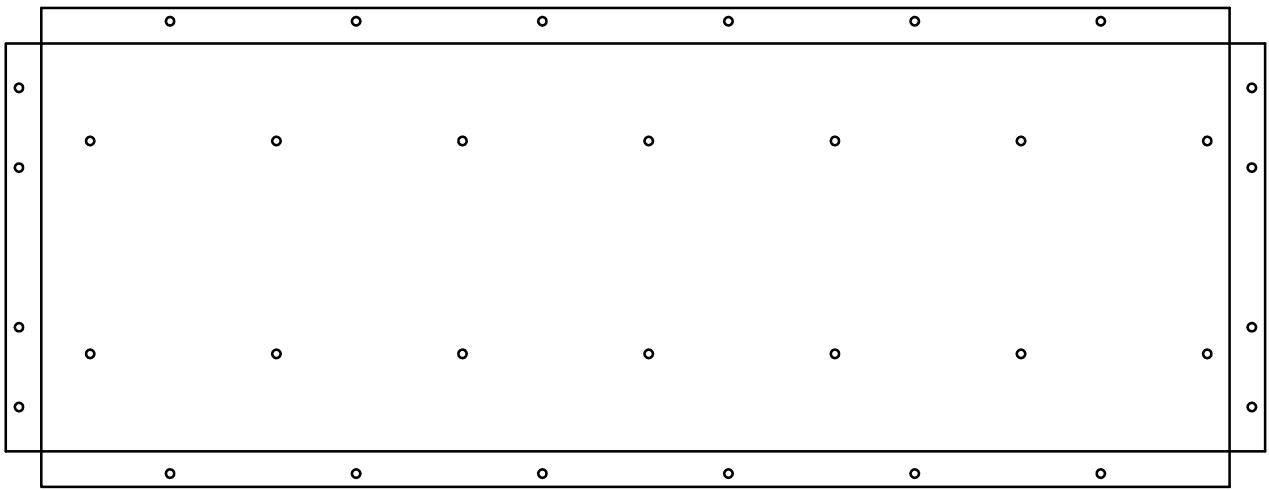
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
	NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:		
DRAWN											
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		apoio parafusos	
										A3	
						WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

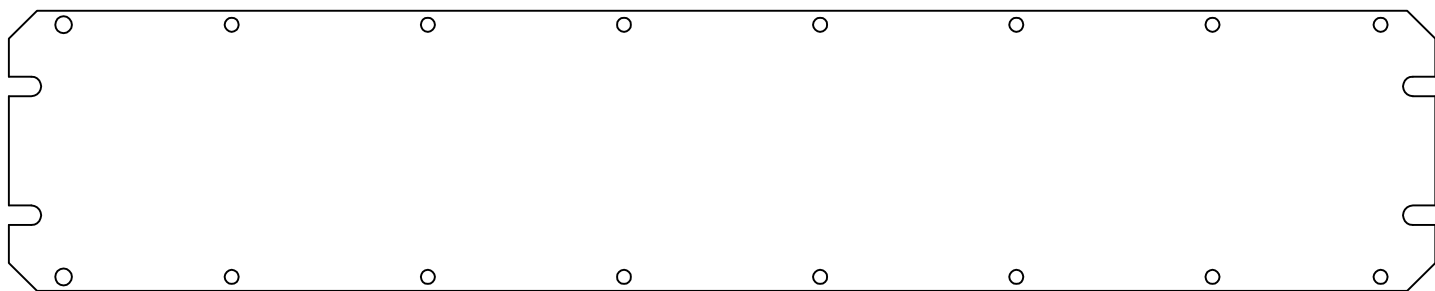


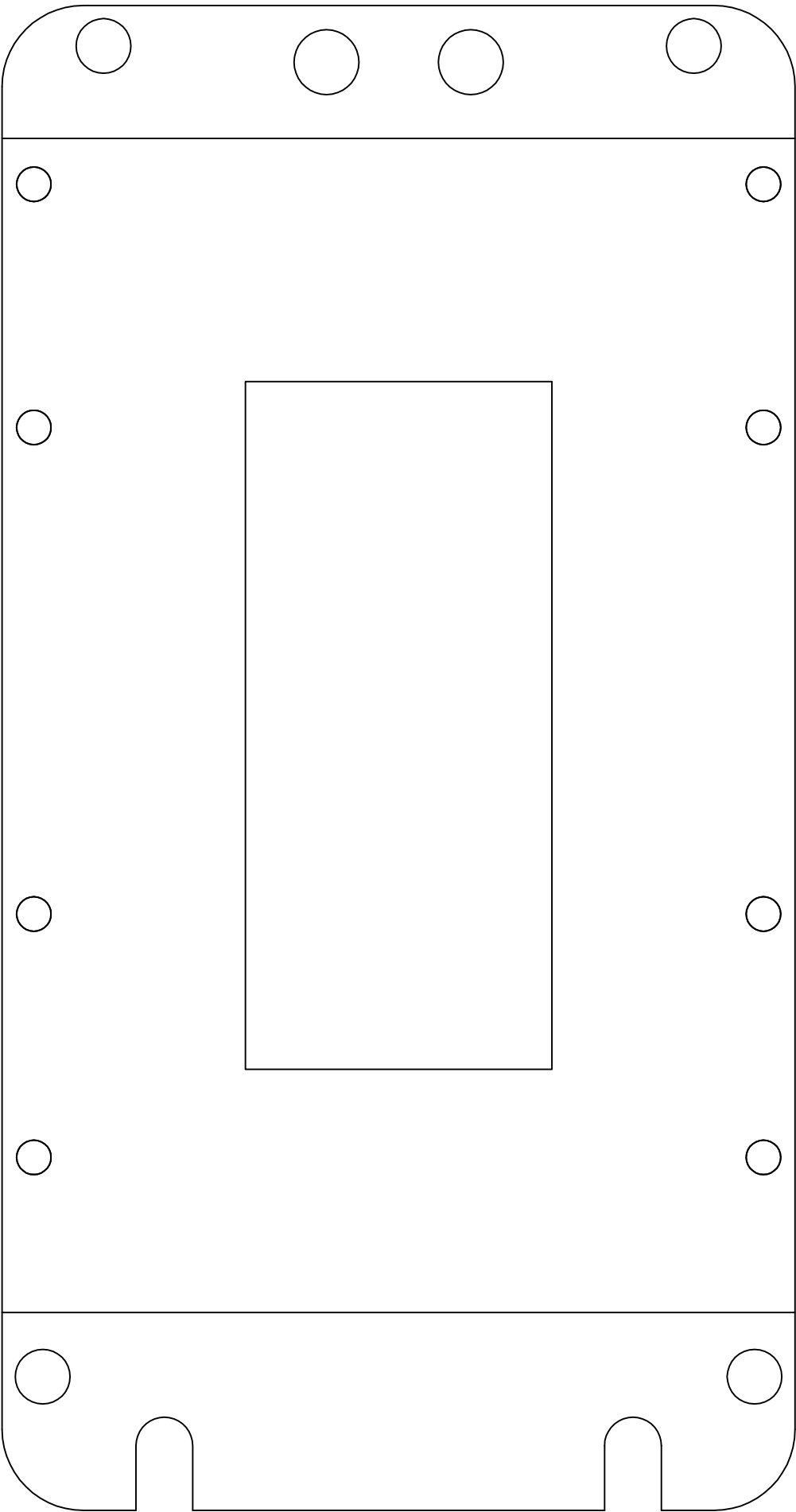
SECTION A-A

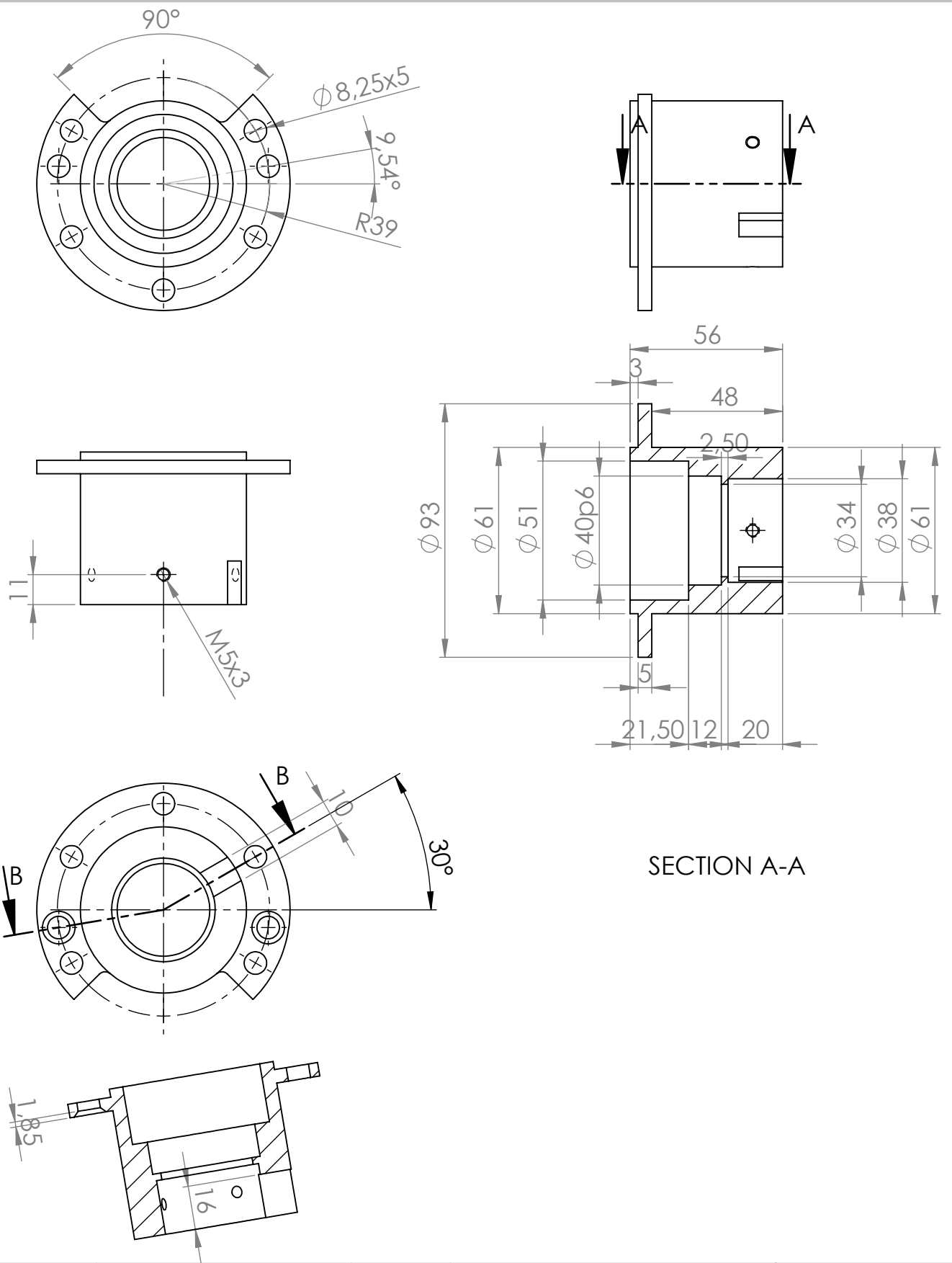
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:					FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE					TITLE:	
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A								DWG NO. apoio rolamento A3	
								SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1
							WEIGHT:		











SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:
SECTION B-B

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

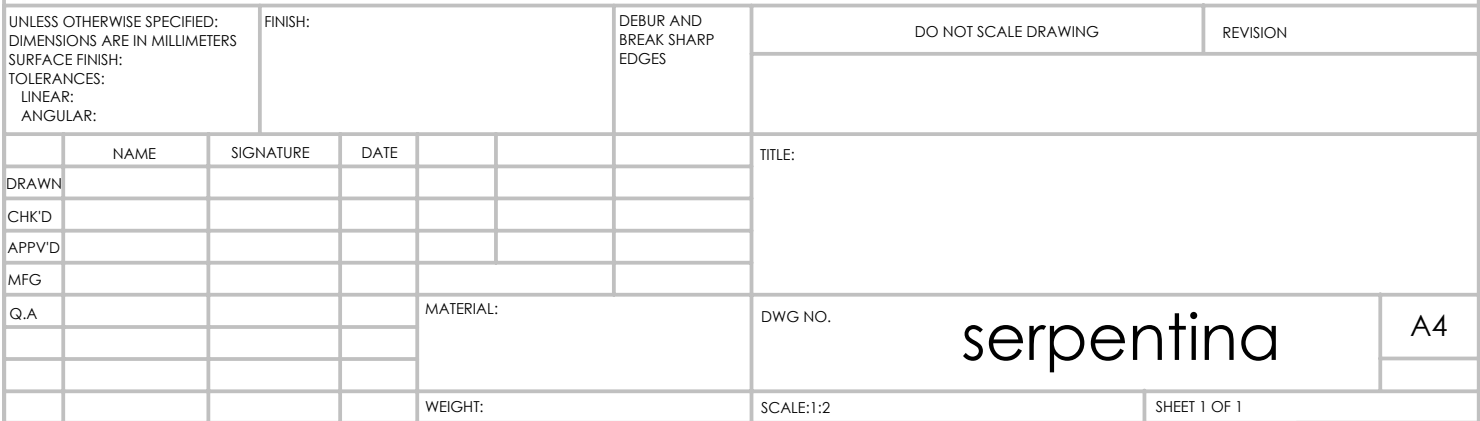
DO NOT SCALE DRAWING

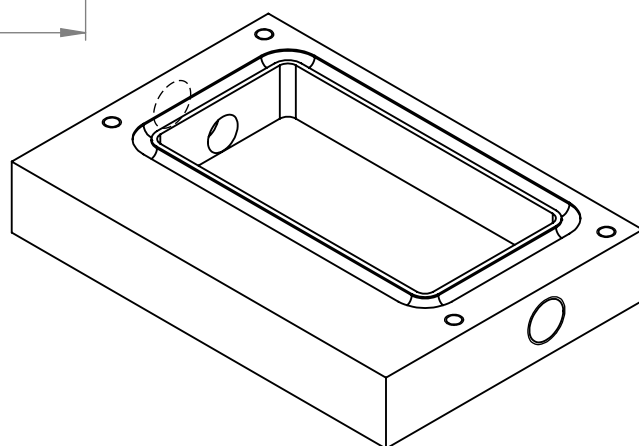
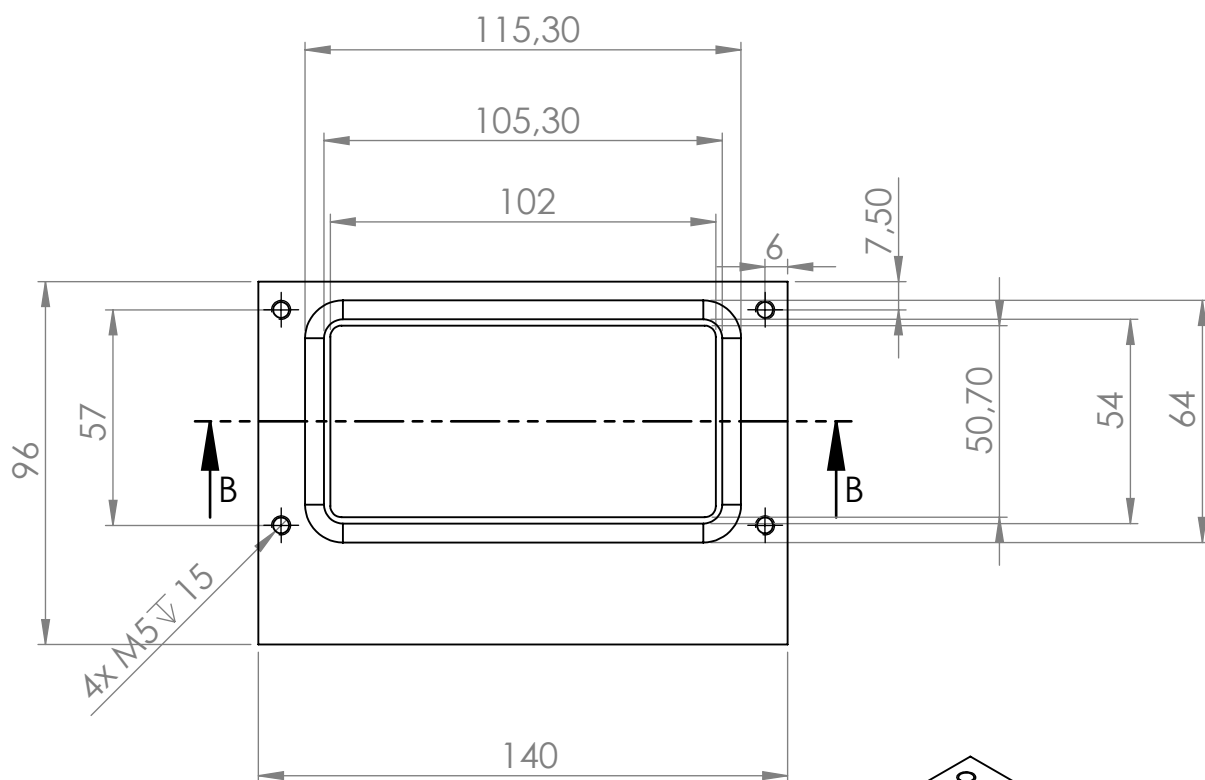
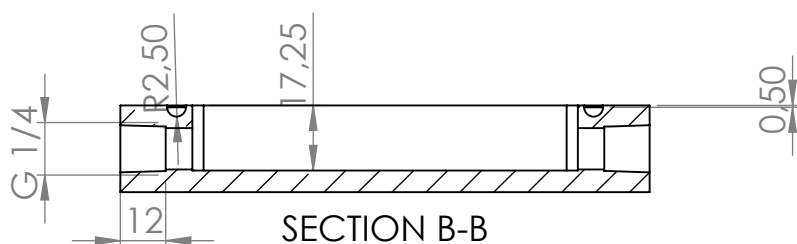
REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			WEIGHT:		

TITLE:			
DWG NO.		A4	
SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

Resolver





UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					
			MATERIAL:		
			WEIGHT:		

TITLE:

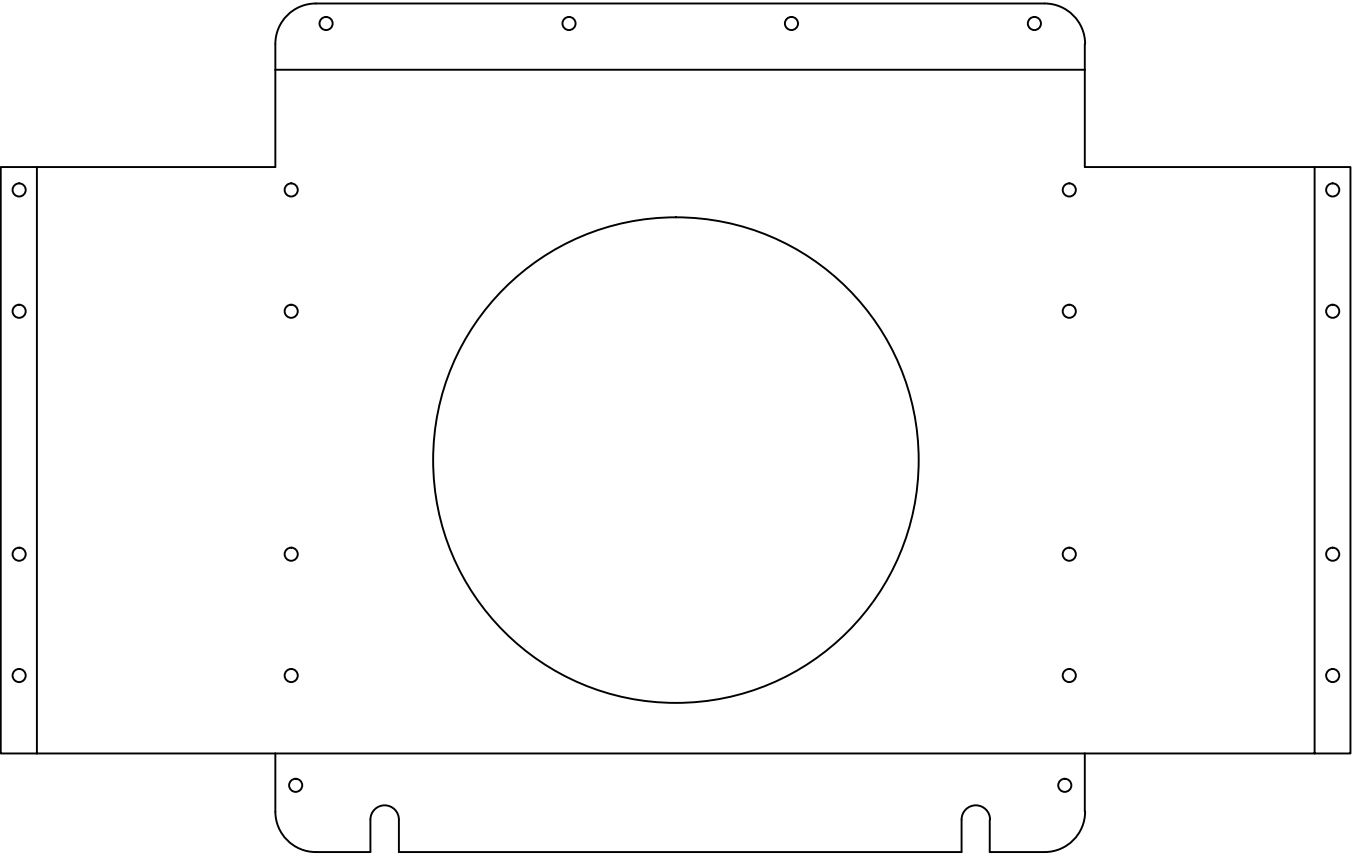
DWG NO.

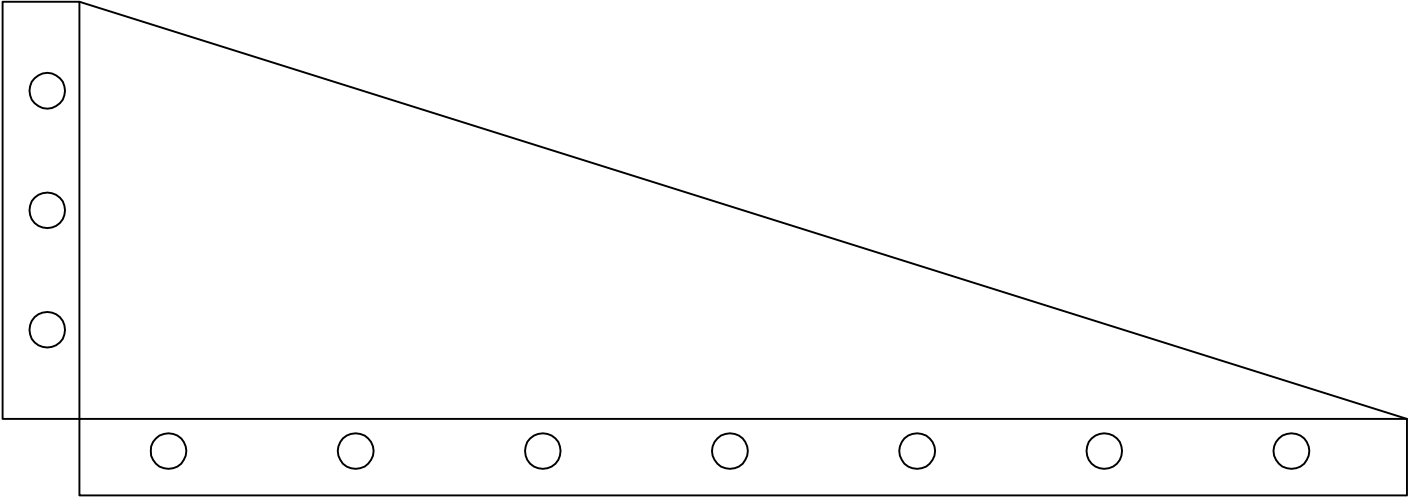
tanque

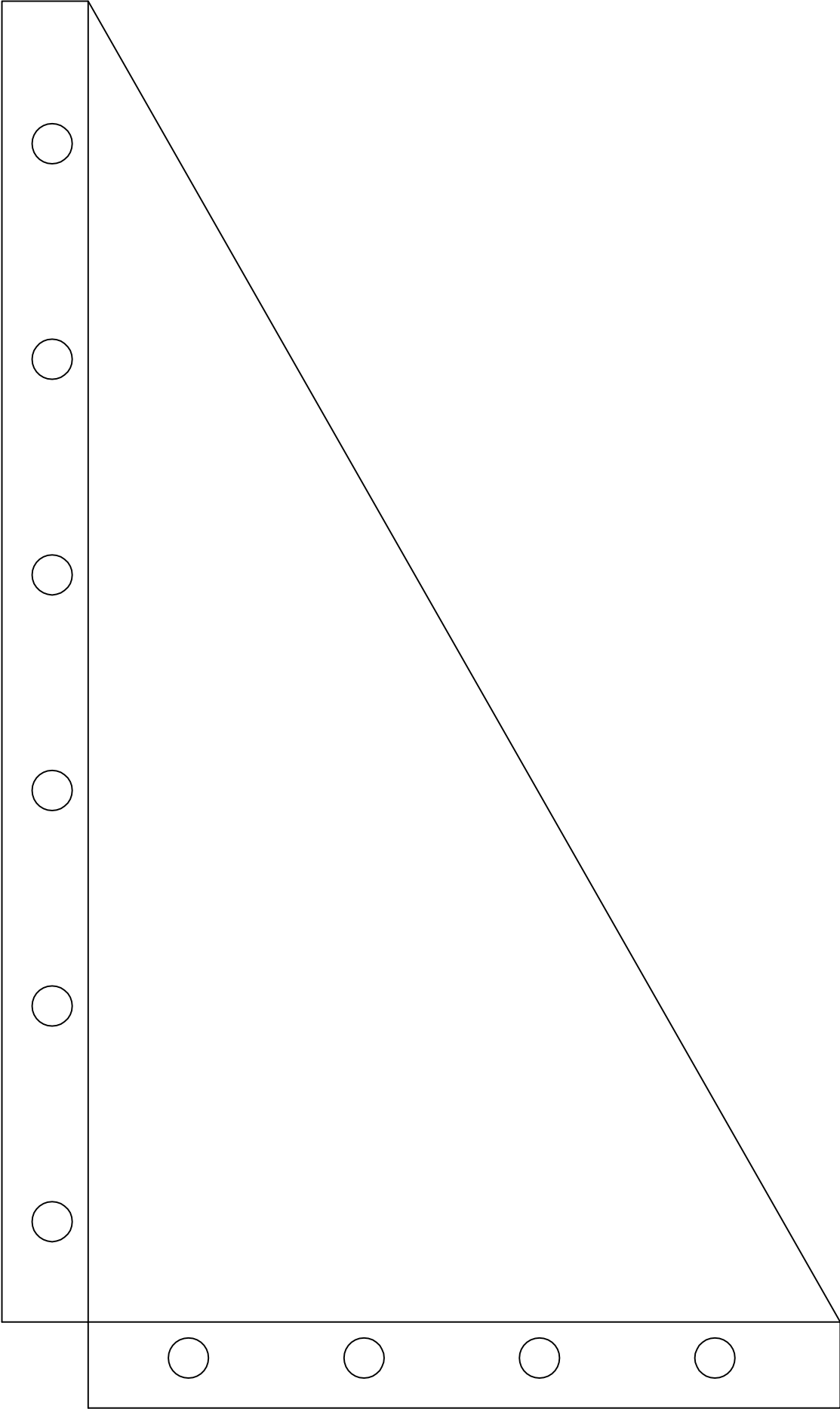
A4

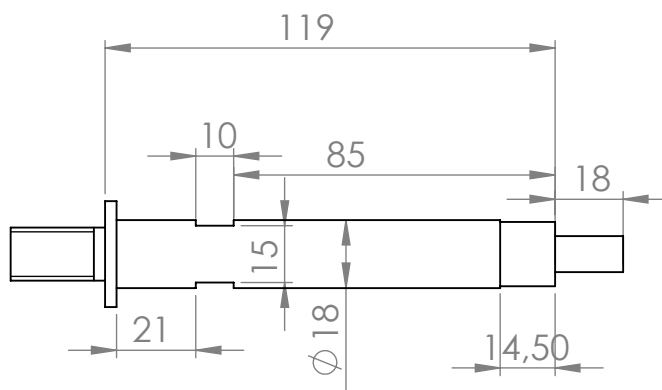
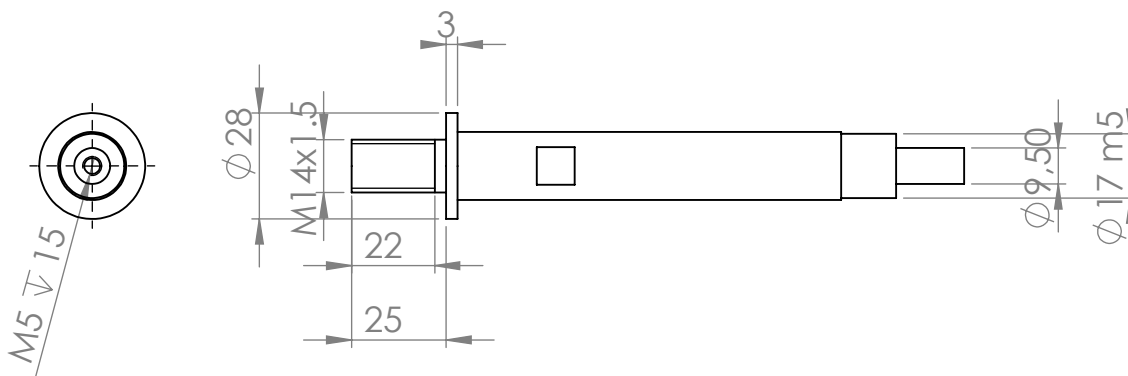
SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1









UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

Veio

11.10. Anexo 10 – Relatório elementos finitos veio de saída de potência

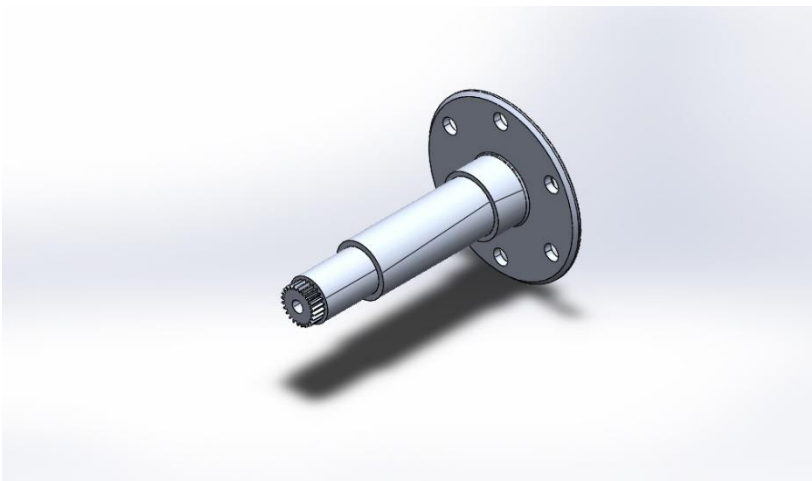
(Página em branco)

Simulation of veio de saída de potência

Date: 1 de julho de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

Table of Contents

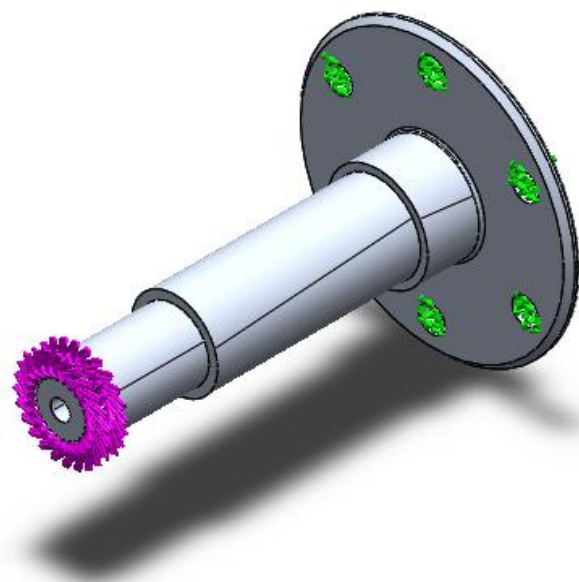
Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Material Properties	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information	5
Study Results	7
Conclusion	10



Description
No Data


Assumptions

Model Information

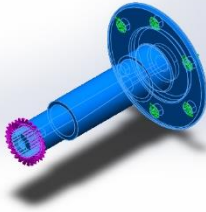


Model name: flange_motor_engrenagem
Current Configuration: Default

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified

<p>Boss-Extrude9</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:0.337158 kg Volume:0.000119985 m³ Density:2810 kg/m³ Weight:3.30415 N</p>	<p>C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogerio\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\flange_motor_engrenagem.SLDPRT Jun 23 16:23:25 2014</p>
--	-------------------	---	--

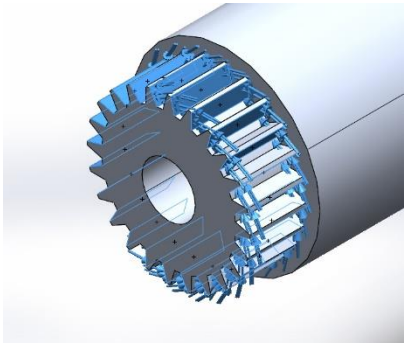
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: 7075-T6 (SN) Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.05e+008 N/m² Tensile strength: 5.7e+008 N/m²</p>	<p>SolidBody 1(Boss-Extrude9)(flange_motor_engrenagem)</p>



Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 6 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-3		Entities: 24 face(s) Type: Apply normal force Value: 965 N

Mesh Information

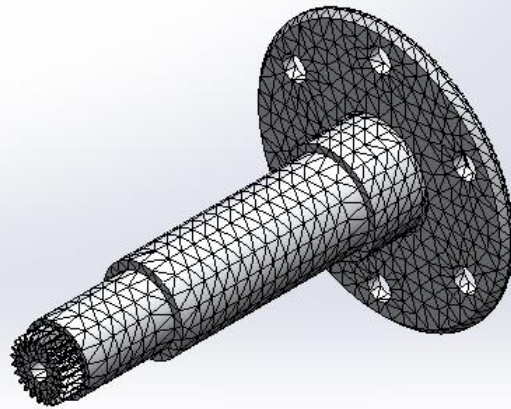
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	4.97777 mm
Tolerance	0.248889 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	18469
Total Elements	11019
Maximum Aspect Ratio	13.21
% of elements with Aspect Ratio < 3	87.5
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.00908
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02
Computer name:	ROSHIBA_L50

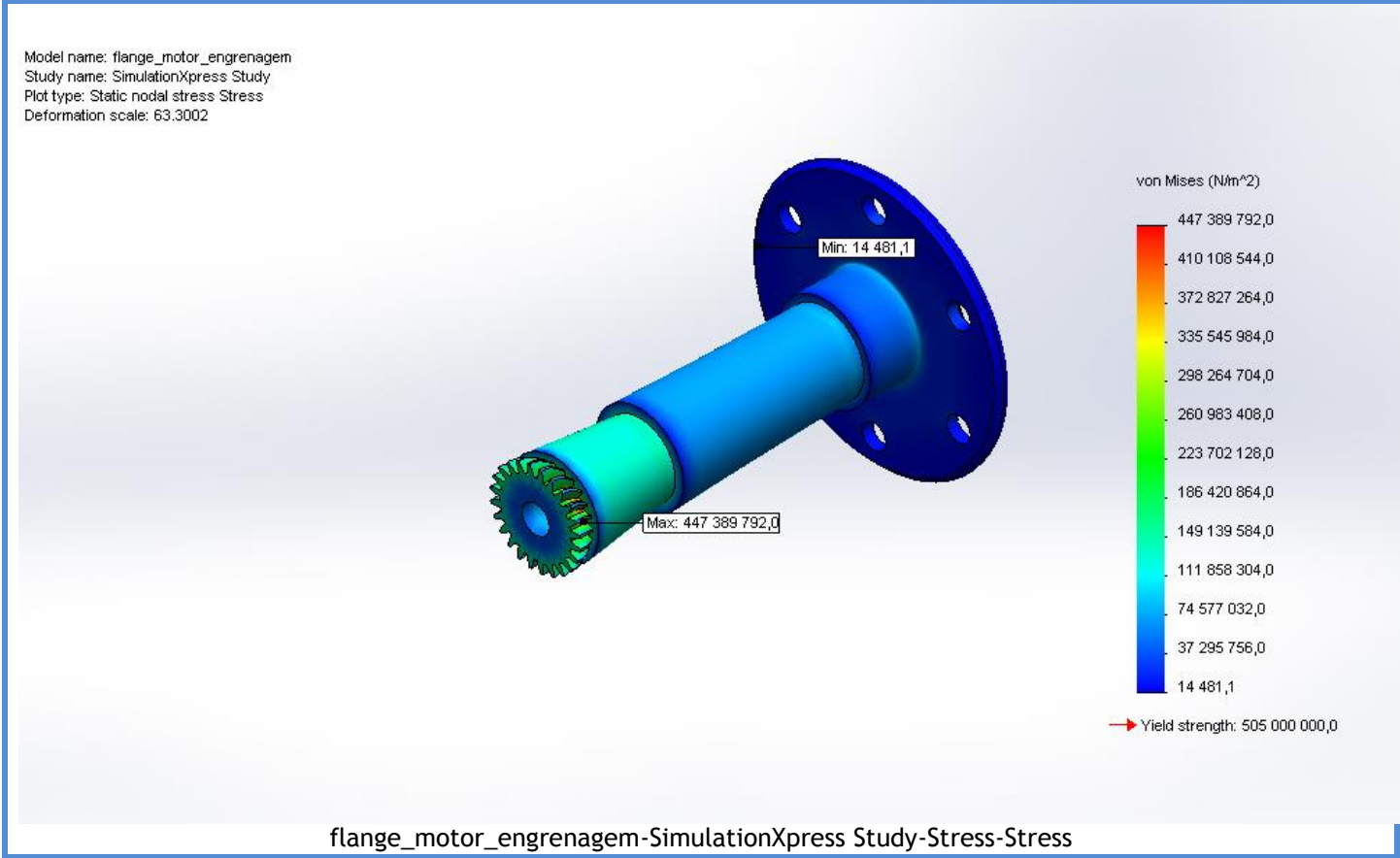


Model name: flange_motor_engrenagem
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh



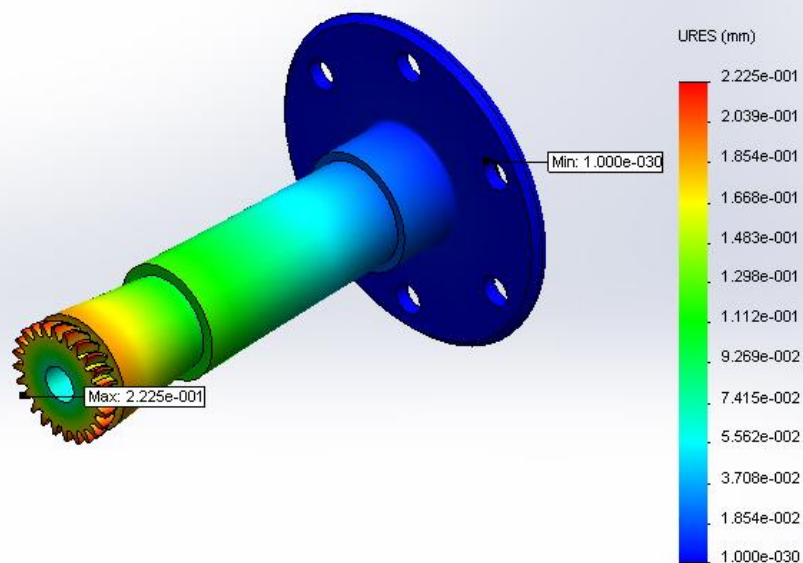
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	14481.1 N/m^2 Node: 558	4.4739e+008 N/m^2 Node: 8679



Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 441	0.22246 mm Node: 1646

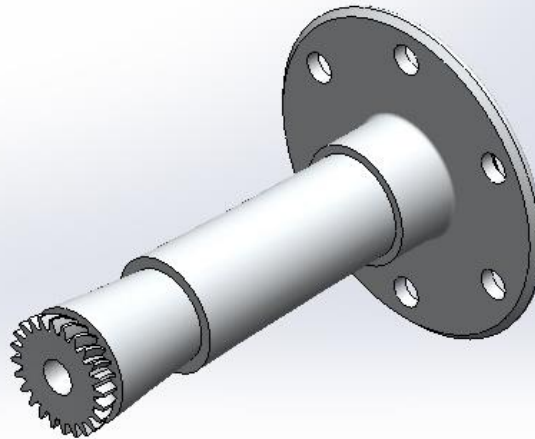
Model name: flange_motor_engrenagem
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 63.3002



flange_motor_engrenagem-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: flange_motor_engrenagem
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Deformed Shape Deformation
 Deformation scale: 63.3002

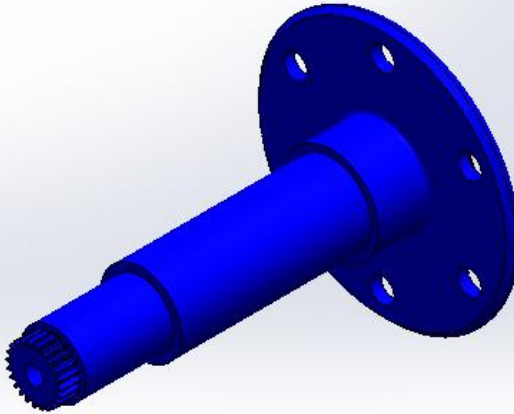


flange_motor_engrenagem-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	1.12877 Node: 8679	34872.9 Node: 558



Model name: flange_motor_engrenagem
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue

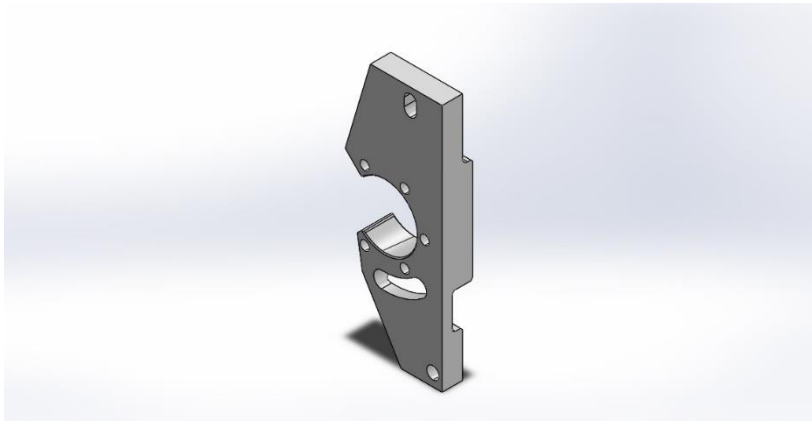


flange_motor_engrenagem-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion

11.11. Anexo 11 – Relatório elementos finitos apoio fixo

(Página em branco)



Description
No Data

Simulation of apoio fixo

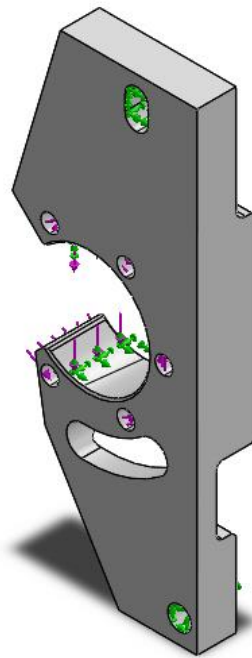
Date: 24 de junho de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

Table of Contents

Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Material Properties	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information	6
Study Results	8
Conclusion	10


Assumptions

Model Information

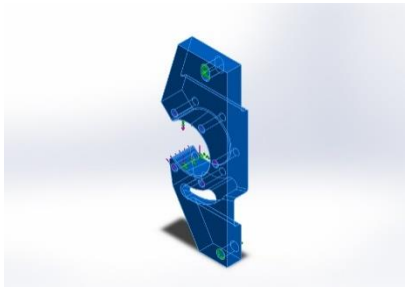


Model name: apoio parafusos
Current Configuration: Default

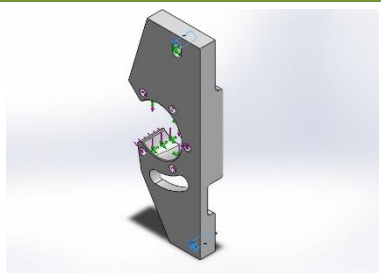
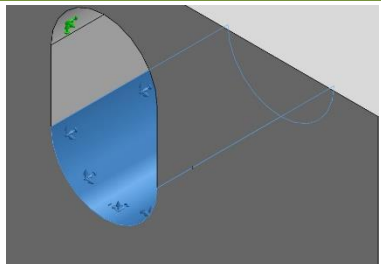
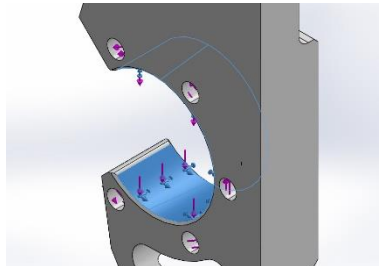
Solid Bodies

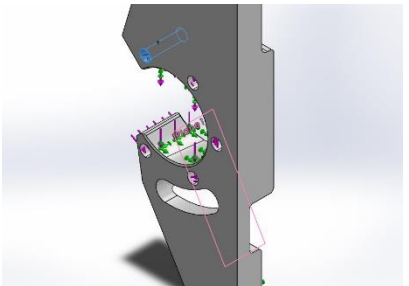
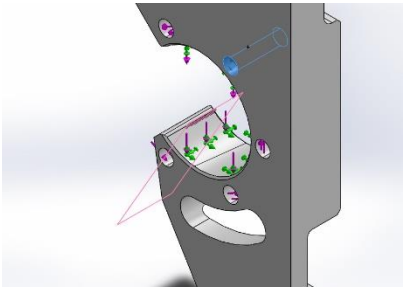
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Chamfer3 	Solid Body	Mass:0.461994 kg Volume:0.000325348 m ³ Density:1420 kg/m ³ Weight:4.52755 N	C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogerio\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\apoio parafusos.SLDPRT Jun 23 18:34:10 2014

Material Properties

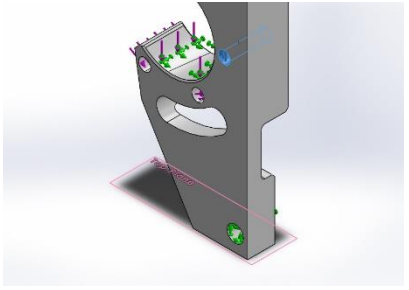
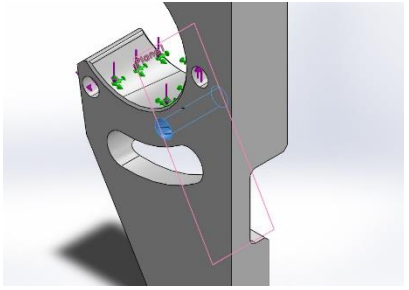
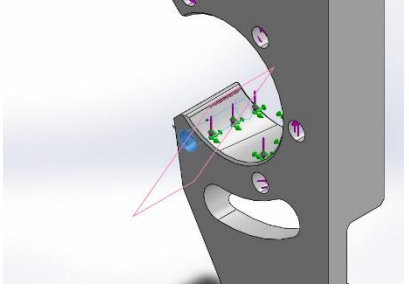
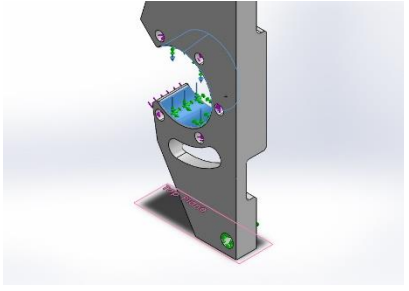
Model Reference	Properties	Components
	<p> Name: PET Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Tensile strength: 5.73e+007 N/m² </p>	<p>SolidBody 1(Chamfer3)(apoio parafusos)</p>

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry
Fixed-2		Entities: 1 face(s) Type: Fixed Geometry
Fixed-3		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Plane1 Type: Apply force Values: ---, ---, -1231 N
Force-2		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Plane2 Type: Apply force Values: ---, ---, -1231 N



Force-3		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Top Plane Type: Apply force Values: ---, ---, 1231 N
Force-4		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Plane1 Type: Apply force Values: ---, ---, 1231 N
Force-5		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Plane2 Type: Apply force Values: ---, ---, 1231 N
Force-6		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Top Plane Type: Apply force Values: ---, ---, -61 N

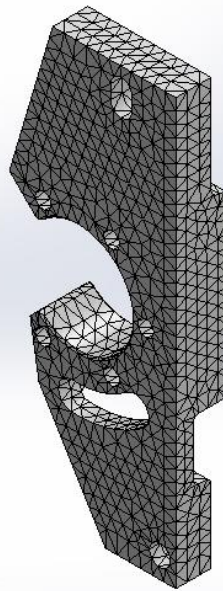
Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	6.65798 mm
Tolerance	0.332899 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	15870
Total Elements	9576
Maximum Aspect Ratio	8.8846
% of elements with Aspect Ratio < 3	96.8
% of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	ROSHIBA_L50

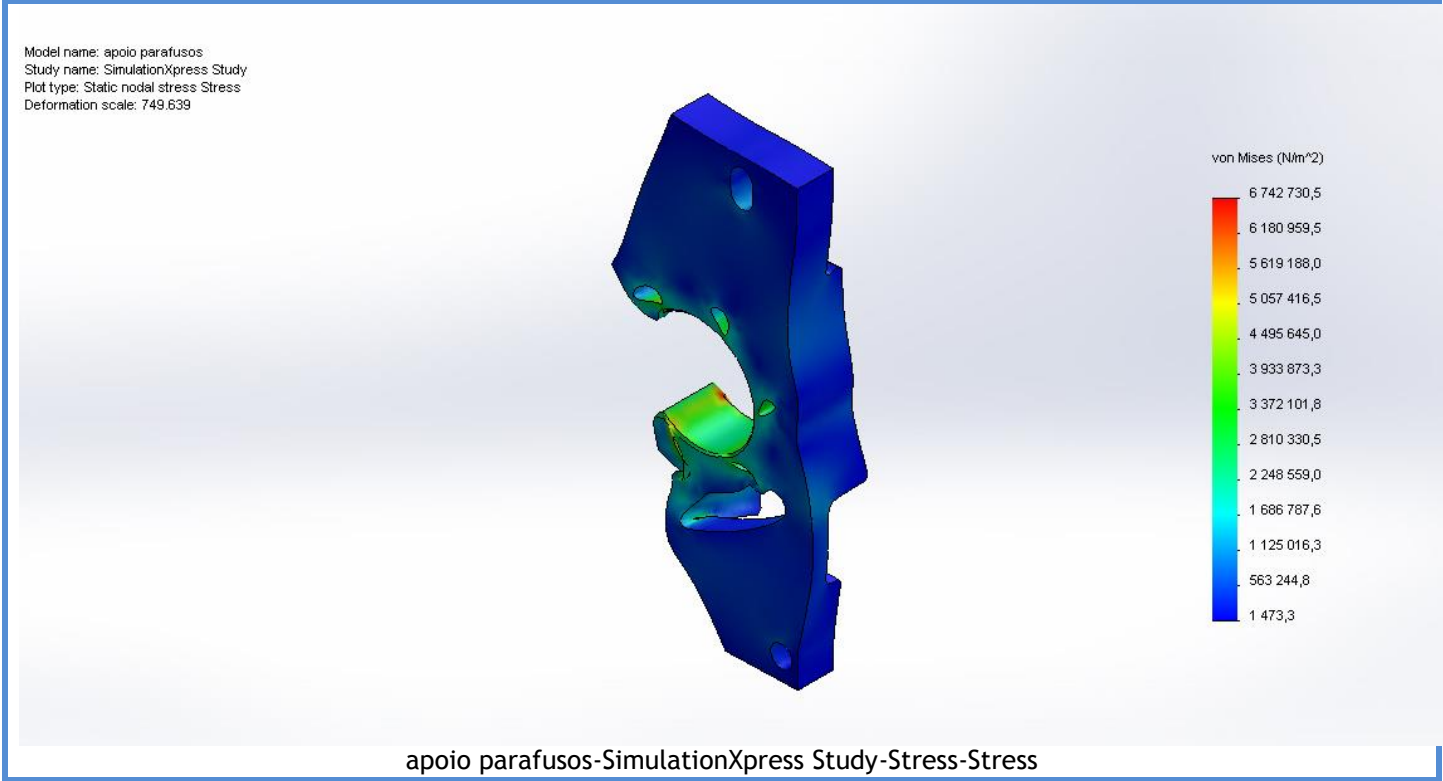
Model name: apoio parafusos
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh





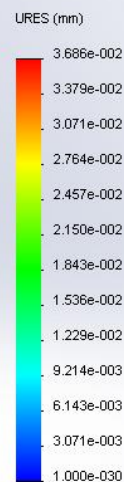
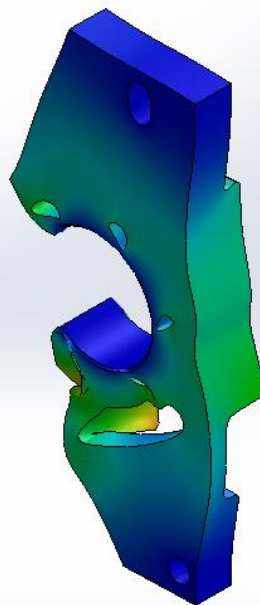
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	1473.34 N/m^2 Node: 915	6.74273e+006 N/m^2 Node: 14133



Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 36	0.0368566 mm Node: 14155

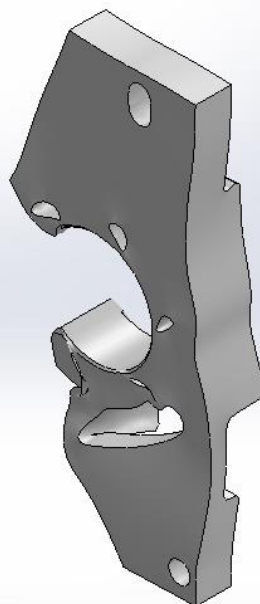
Model name: apoio parafusos
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 749.639



apoio parafusos-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: apoio parafusos
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Deformed Shape Deformation
 Deformation scale: 749.639

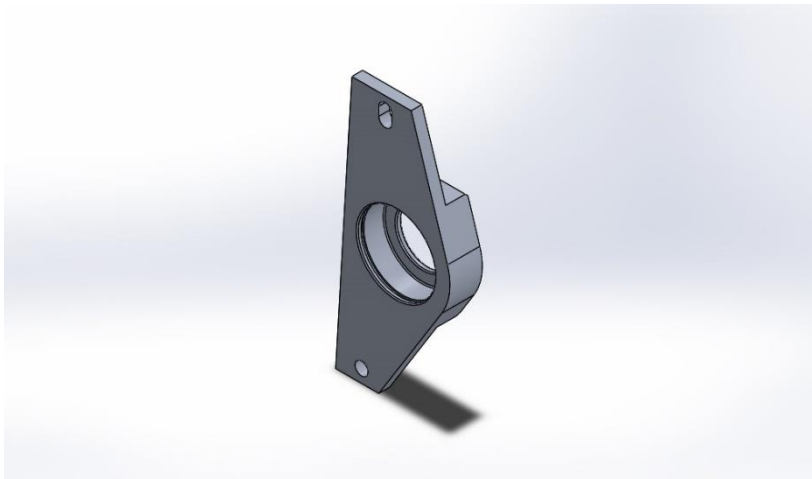


apoio parafusos-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Conclusion

11.12. Anexo 12 – Relatório elementos finitos apoio veio de transmissão

(Página em branco)



Description
Apoio rolamento
espessura 30mm

Simulation of apoio veio de transmissão

Date: 24 de junho de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

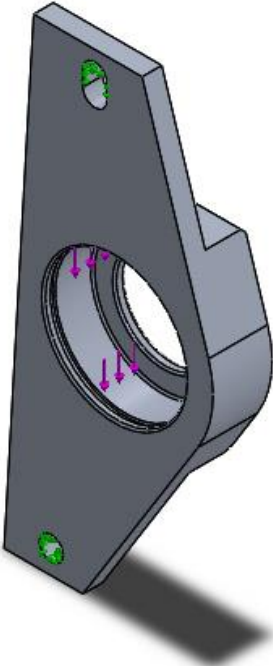
Table of Contents

Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Material Properties	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information	5
Study Results	7
Conclusion	10



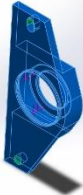
Assumptions

Model Information

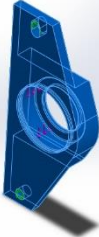


Model name: apoio rolamento
Current Configuration: Default

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified

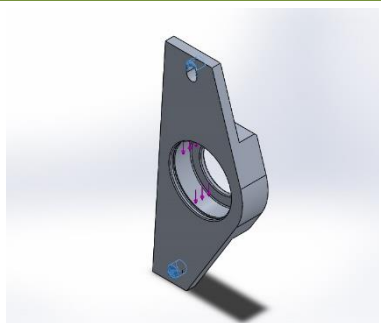
<p>Chamfer1</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:0.710594 kg Volume:0.000252881 m³ Density:2810 kg/m³ Weight:6.96382 N</p>	<p>C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogerio\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\apoio rolamento.SLDPRT Jun 24 00:22:43 2014</p>
---	-------------------	---	--

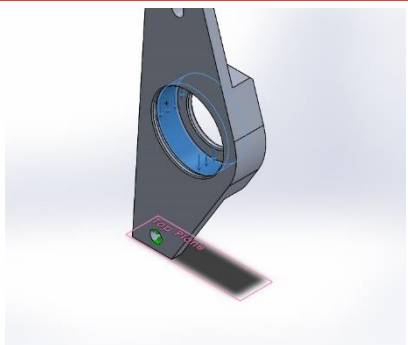
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: 7075-T6 (SN) Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 5.05e+008 N/m² Tensile strength: 5.7e+008 N/m²</p>	<p>SolidBody 1(Chamfer1)(apoio rolamento)</p>



Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Top Plane Type: Apply force Values: ---, ---, -61 N

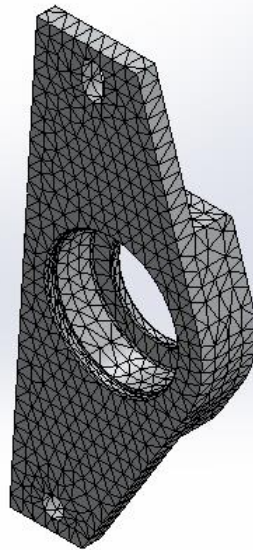
Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Maximum element size	0 mm
Minimum element size	0 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	12850
Total Elements	7494
Maximum Aspect Ratio	21.358
% of elements with Aspect Ratio < 3	89.5
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.12
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01
Computer name:	ROSHIBA_L50

Model name: apoio rolamento
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh

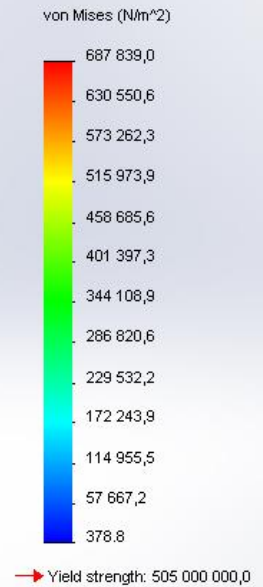
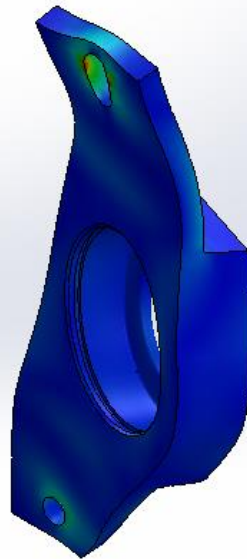




Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	378.822 N/m ² Node: 384	687839 N/m ² Node: 12339

Model name: apoio rolamento
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Static nodal stress Stress
Deformation scale: 76790.8



apoio rolamento-SimulationXpress Study-Stress-Stress

Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 83	0.000359893 mm Node: 911

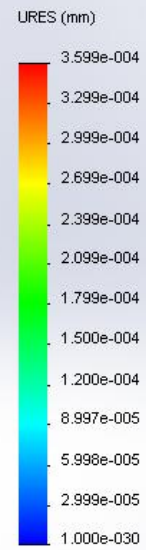
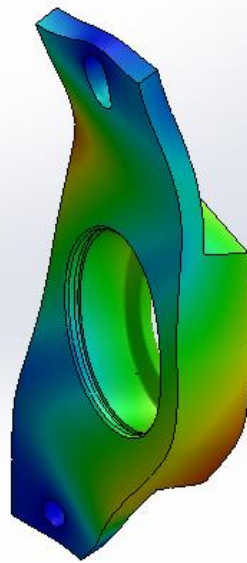


SOLIDWORKS

Analyzed with SolidWorks Simulation

Simulation of apoio rolamento

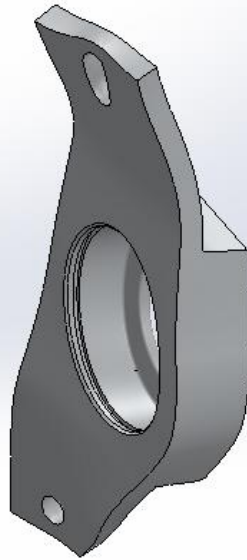
Model name: apoio rolamento
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Static displacement Displacement
Deformation scale: 76790.8



apoio rolamento-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: apoio rolamento
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Deformed Shape Deformation
Deformation scale: 76790.8

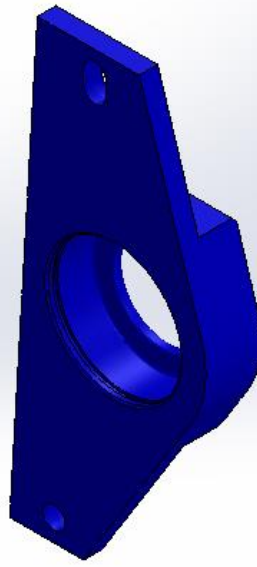


apoio rolamento-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	734.183 Node: 12339	1.33308e+006 Node: 384



Model name: apoio rolamento
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue

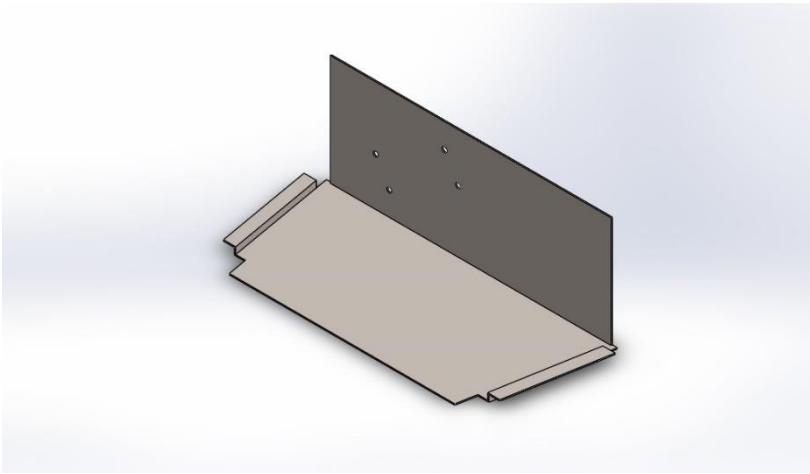


apoio rolamento-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion

11.13. Anexo 13 – Relatório elementos finitos suporte 1 - baterias

(Página em branco)



Description
No Data

Simulation of suporte baterias 1

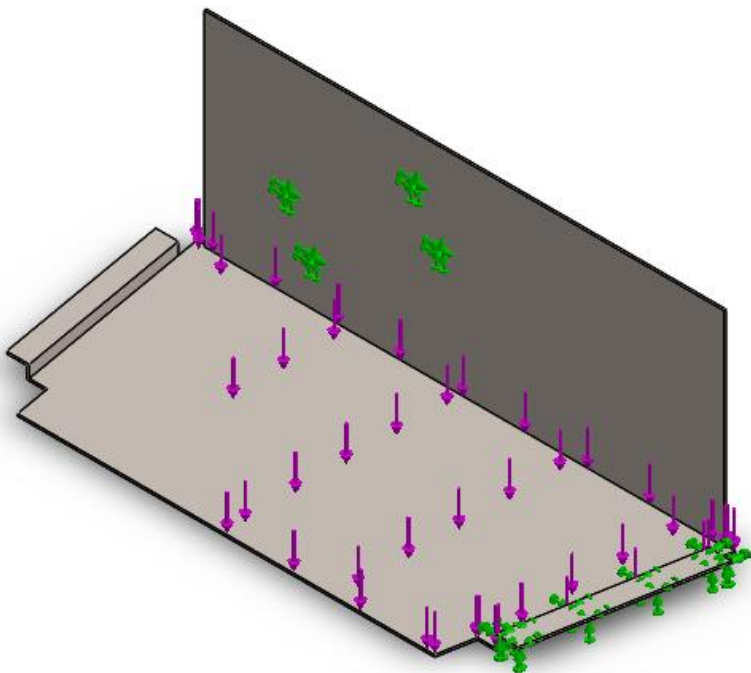
Date: 1 de julho de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

Table of Contents

Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Material Properties	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information	5
Study Results	7
Conclusion	10

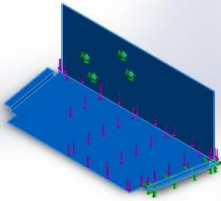
Assumptions

Model Information

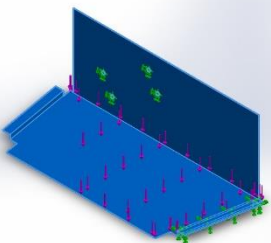


Model name: suporte baterias 1
Current Configuration: Default

Solid Bodies			
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified

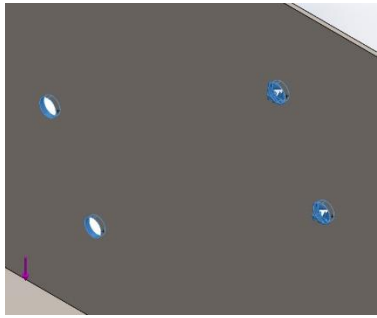
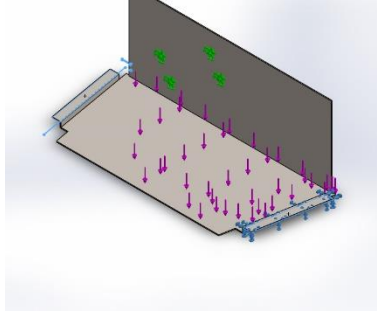
<p>Cut-Extrude5</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:5.51205 kg Volume:0.000715851 m³ Density:7700 kg/m³ Weight:54.0181 N</p>	<p>C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogerio\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\suporte baterias 1.SLDPRT Jun 24 16:41:26 2014</p>
---	-------------------	--	---

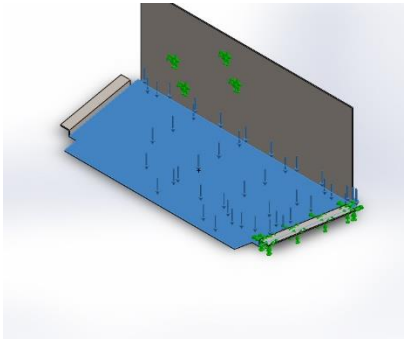
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: Alloy Steel Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Yield strength: 6.20422e+008 N/m² Tensile strength: 7.23826e+008 N/m²</p>	<p>SolidBody 1(Cut-Extrude5)(suporte baterias 1)</p>



Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-4		Entities: 4 face(s) Type: Fixed Geometry
Fixed-6		Entities: 2 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-3		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 270 N

Mesh Information

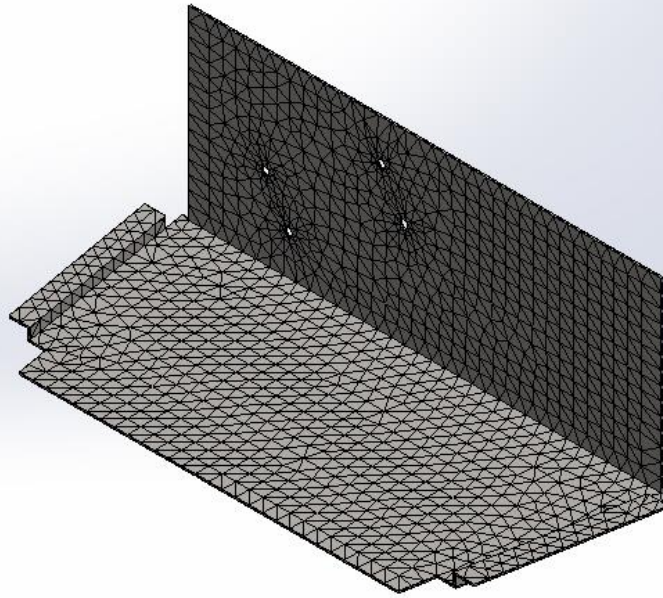
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	16.4669 mm
Tolerance	0.823344 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	14650
Total Elements	7116
Maximum Aspect Ratio	20.352
% of elements with Aspect Ratio < 3	2.16
% of elements with Aspect Ratio > 10	1.97
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02
Computer name:	ROSHIBA_L50

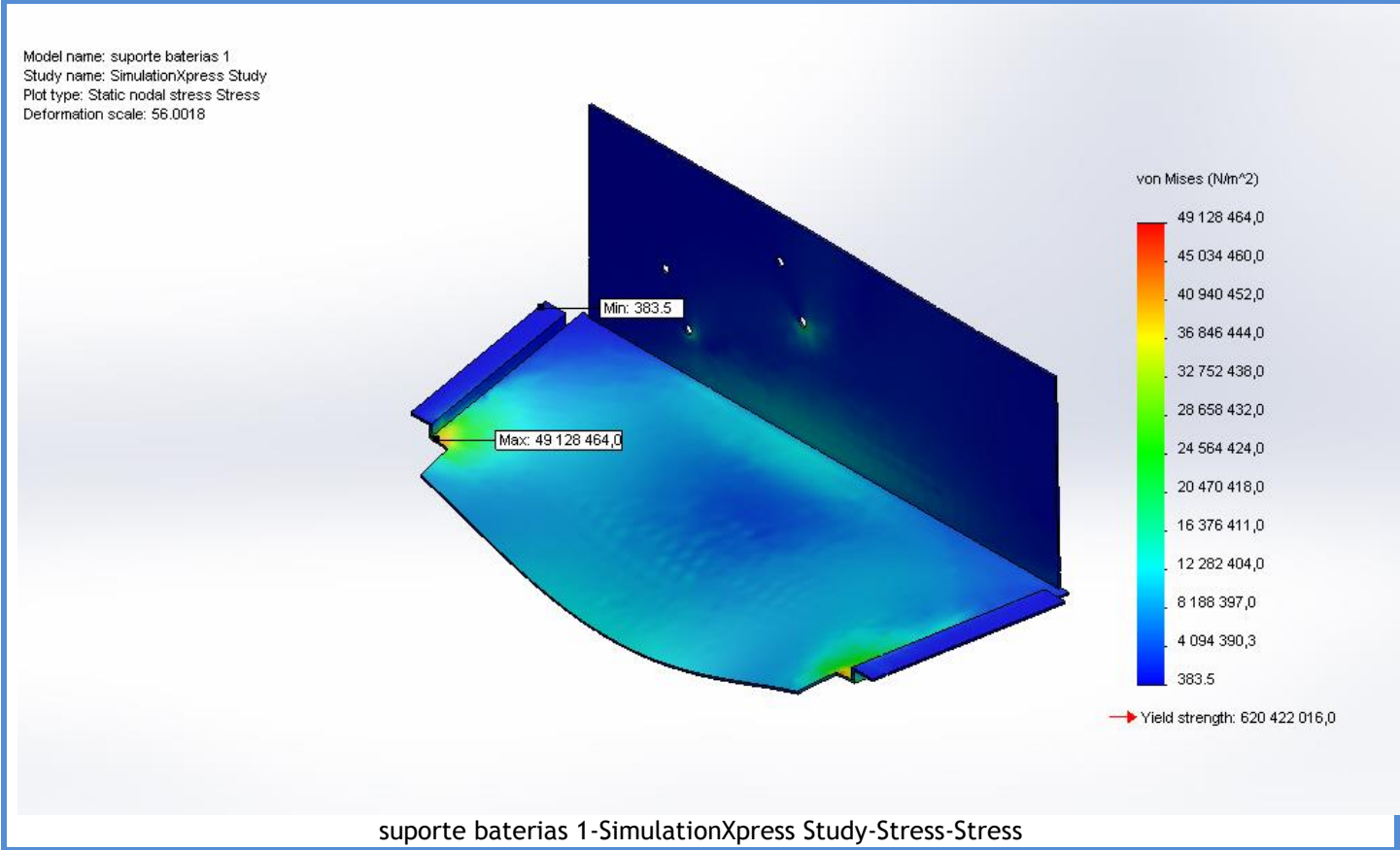


Model name: suporte baterias 1
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh



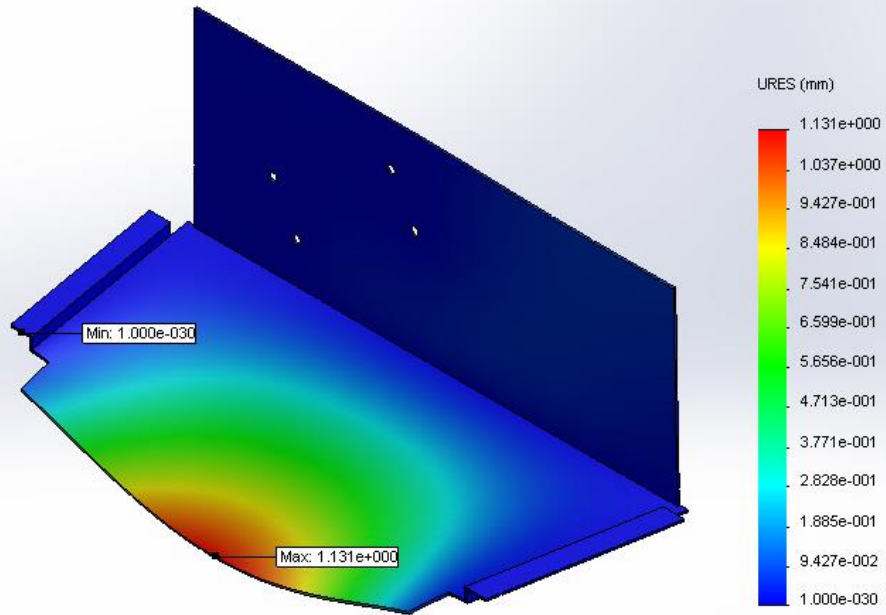
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	383.504 N/m^2 Node: 7855	4.91285e+007 N/m^2 Node: 9821



Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	1.13119 mm Node: 776

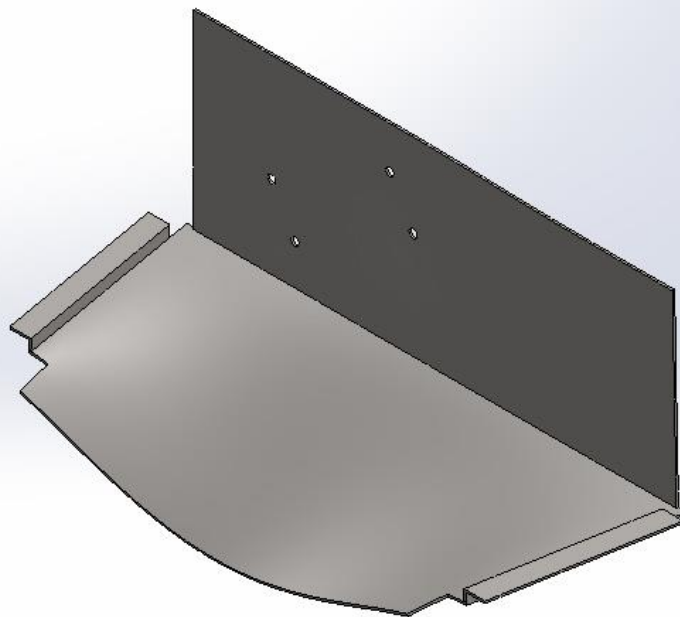
Model name: suporte baterias 1
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 56.0018



suporte baterias 1-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: soporte baterias 1
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Deformed Shape Deformation
 Deformation scale: 56.0018

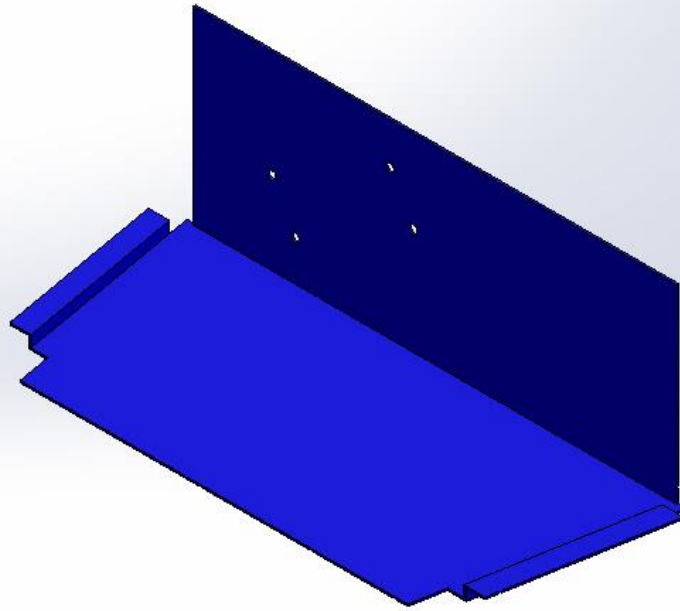


soporte baterias 1-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	12.6286 Node: 9821	1.61777e+006 Node: 7855



Model name: suporte baterias 1
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue

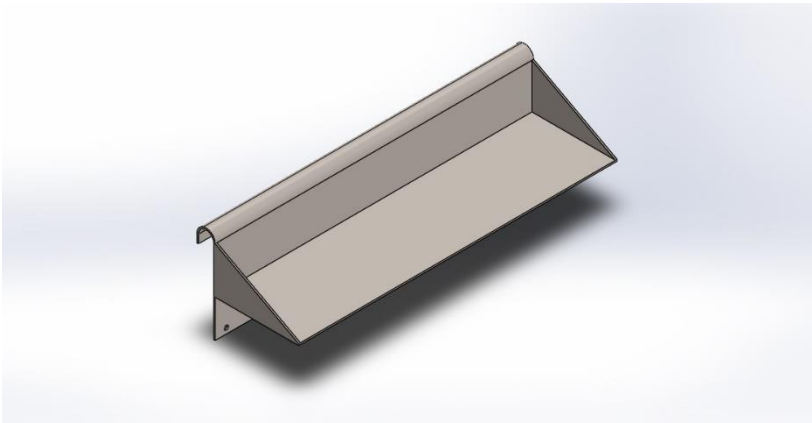


suporte baterias 1-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion

11.14. Anexo 14 – Relatório elementos finitos suporte 2 - baterias

(Página em branco)



Description
No Data

Simulation of soporte baterias 2

Date: 25 de abril de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

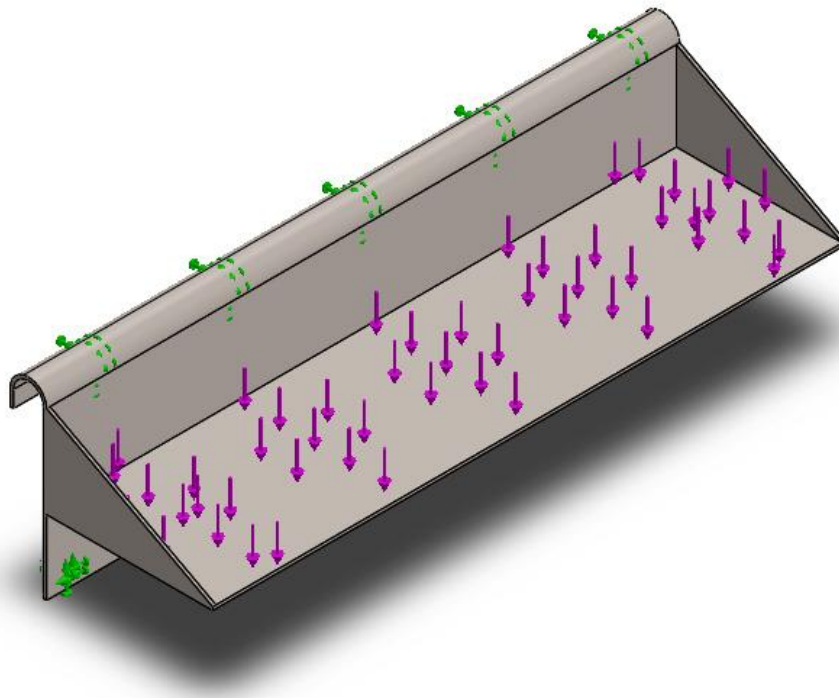
Table of Contents

- Description 1
- Assumptions 2
- Model Information 2
- Material Properties 3
- Loads and Fixtures 3
- Mesh Information..... 4
- Study Results..... 6
- Conclusion 8



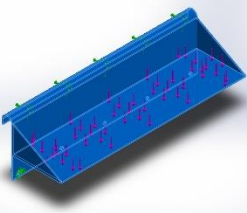
Assumptions

Model Information



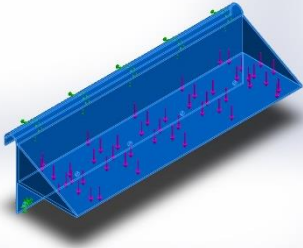
Model name: suporte baterias 3
Current Configuration: Default

Solid Bodies

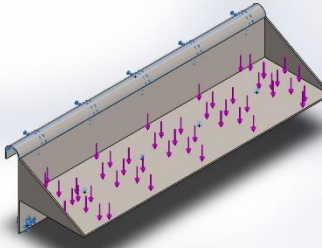
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Boss-Extrude4 	Solid Body	Mass:5.05413 kg Volume:0.000656381 m ³ Density:7700 kg/m ³ Weight:49.5305 N	C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogério\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\suporte baterias 3.SLDPRPT Apr 25 18:36:05 2014

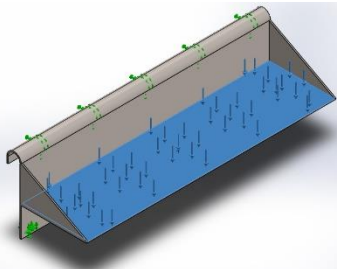


Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: Alloy Steel Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.20422e+008 N/m ² Tensile strength: 7.23826e+008 N/m ²	SolidBody 1(Boss-Extrude4)(suporte baterias 3)

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 6 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 125 N



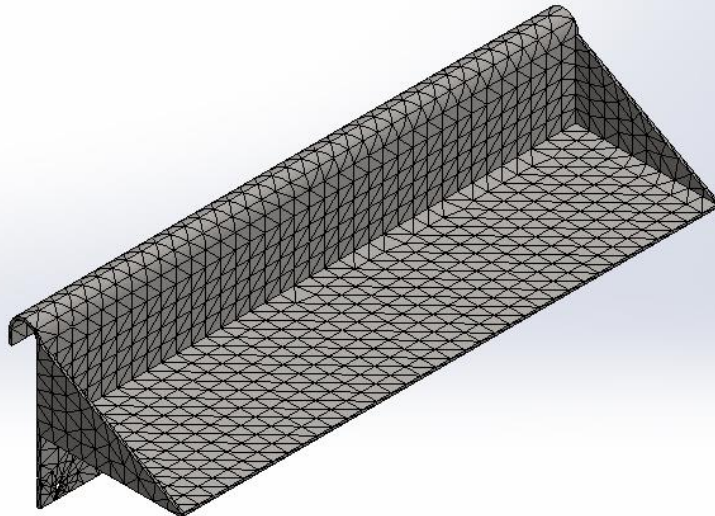
Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	15.8406 mm
Tolerance	0.792029 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	12339
Total Elements	5975
Maximum Aspect Ratio	18.694
% of elements with Aspect Ratio < 3	7.6
% of elements with Aspect Ratio > 10	1.42
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02
Computer name:	ROSHIBA_L50

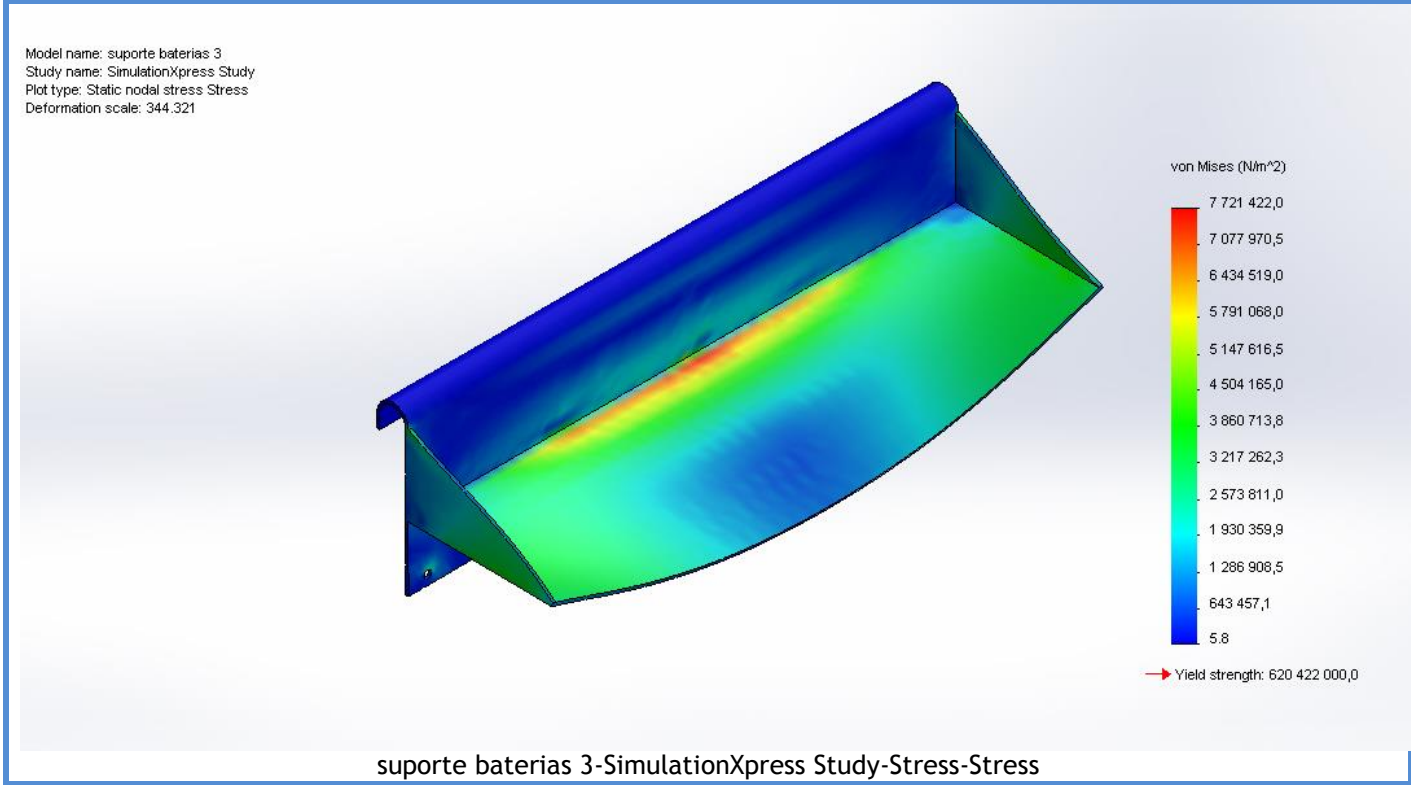
Model name: soporte baterias 3
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh





Study Results

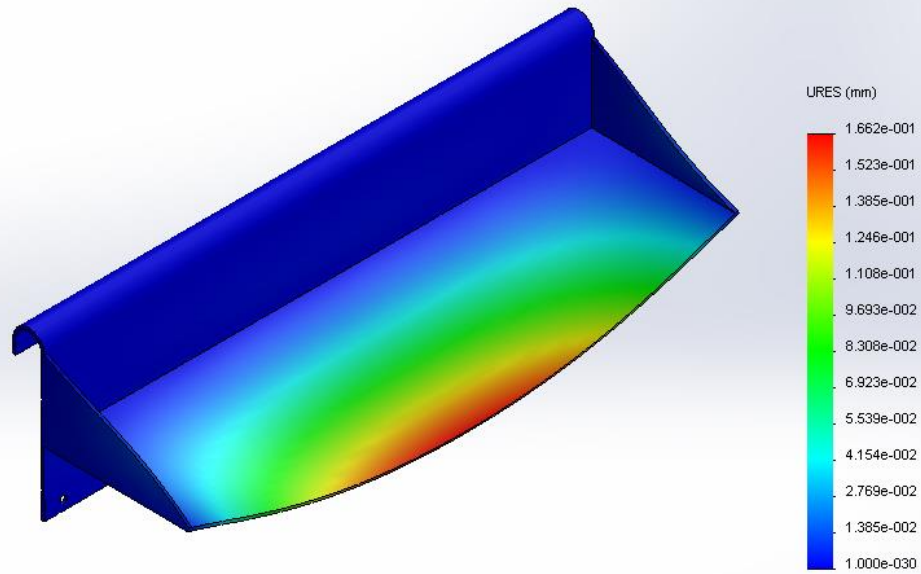
Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	5.83116 N/m^2 Node: 10839	7.72142e+006 N/m^2 Node: 6532



Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	0.166158 mm Node: 1756



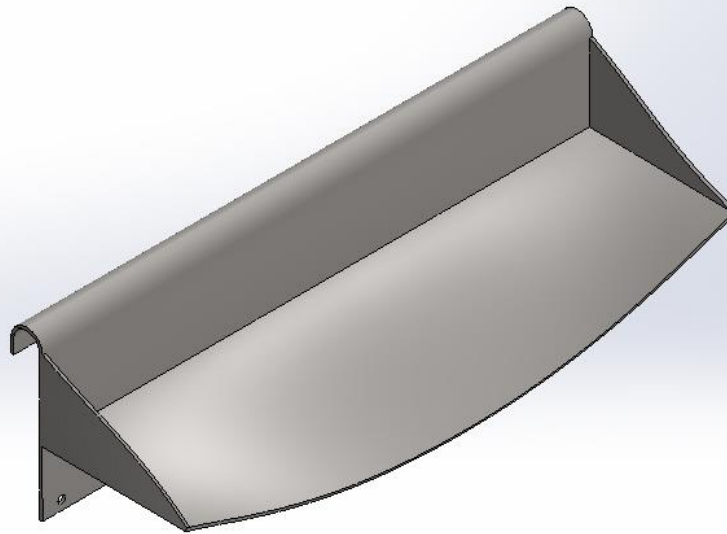
Model name: suporte baterias 3
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 344.321



suporte baterias 3-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

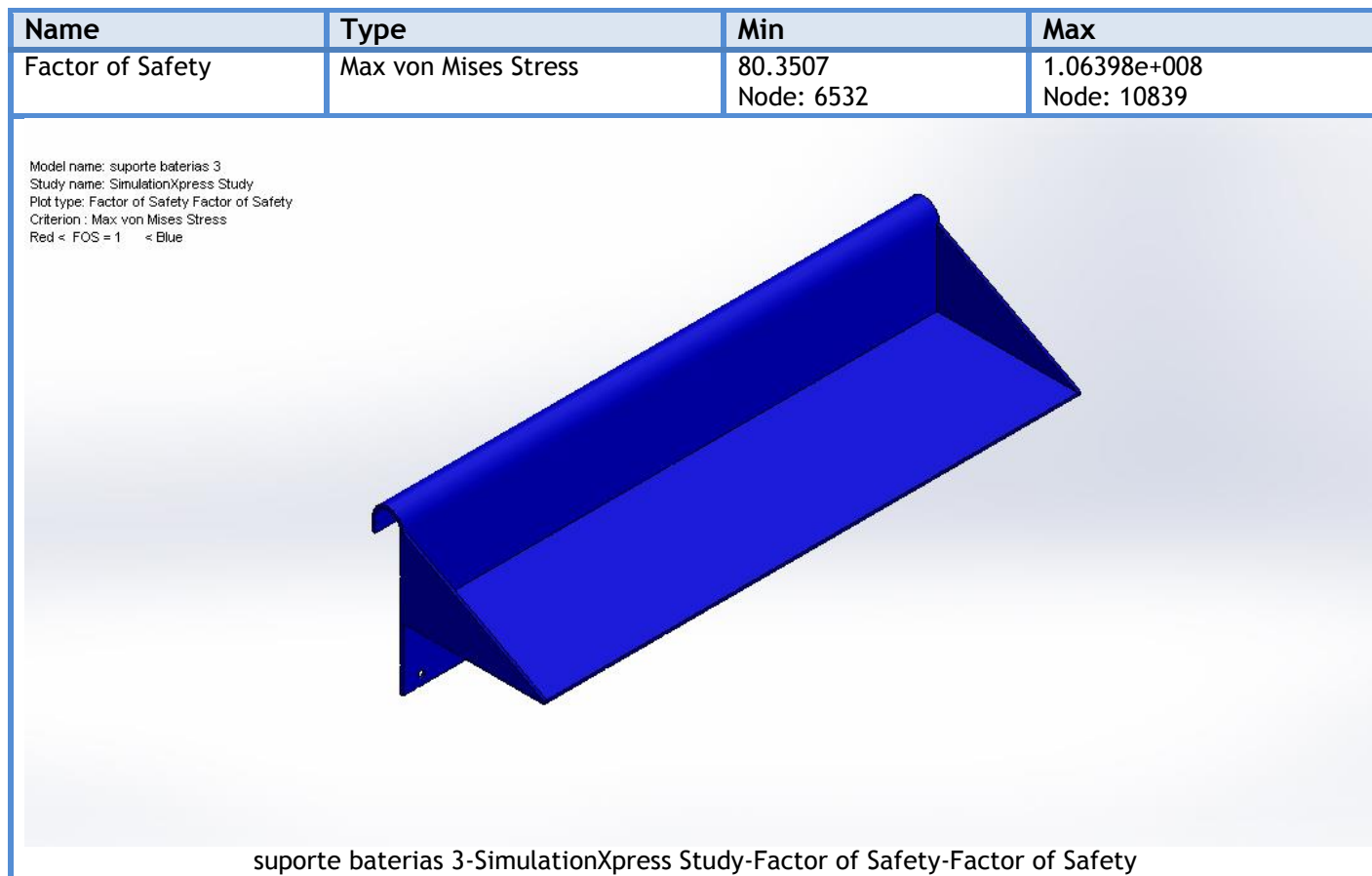
Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: suporte baterias 3
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Deformed Shape Deformation
 Deformation scale: 344.321



suporte baterias 3-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation





Conclusion



11.15. Anexo 15 – Relatório elementos finitos suporte 3 – baterias

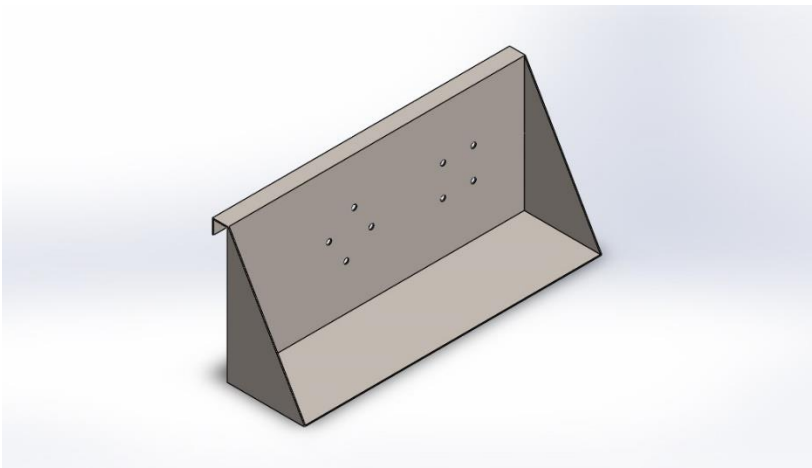
(Página em branco)

Simulation of suporte baterias 3

Date: 25 de junho de 2014
Designer: Solidworks
Study name: SimulationXpress Study
Analysis type: Static

Table of Contents

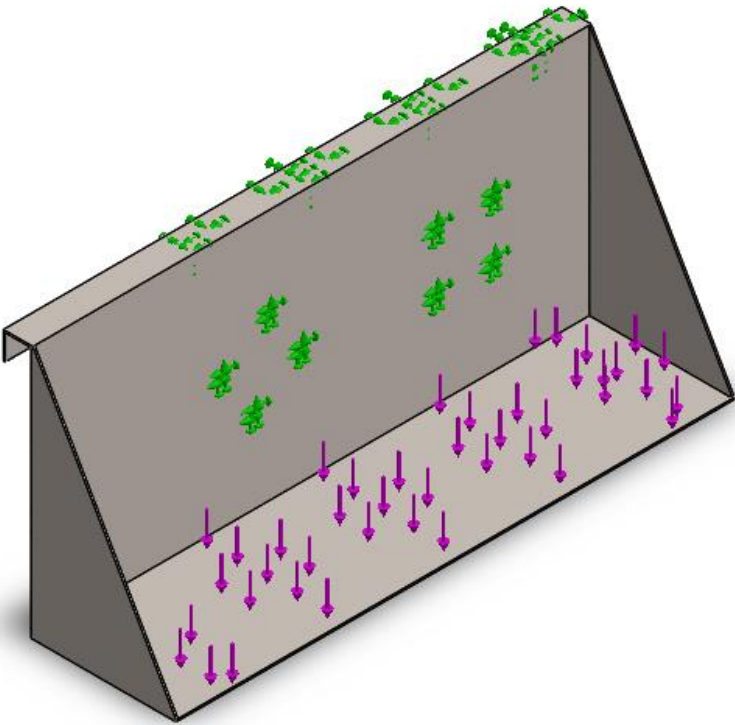
Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Material Properties	3
Loads and Fixtures.....	4
Mesh Information	5
Study Results	7
Conclusion	10



Description
No Data

Assumptions

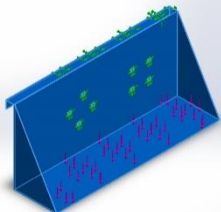
Model Information



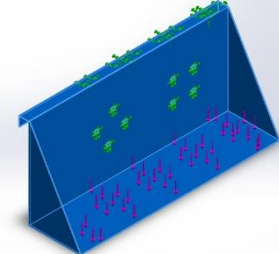
Model name: soporte baterias 3
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
-----------------------------	------------	-----------------------	-----------------------------

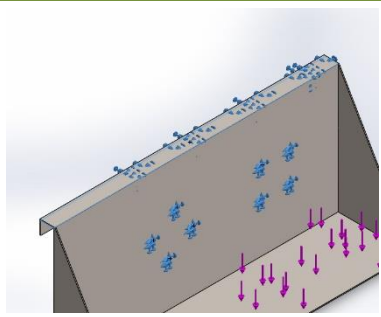
<p>Cut-Extrude1</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:4.84033 kg Volume:0.000628614 m³ Density:7700 kg/m³ Weight:47.4352 N</p>	<p>C:\Users\ROGERIO\Desktop\Rogerio\FEUP\ano5\Dissertação\Desenhos\suporte baterias 3.SLDPRT Jun 25 01:15:06 2014</p>
---	-------------------	--	---

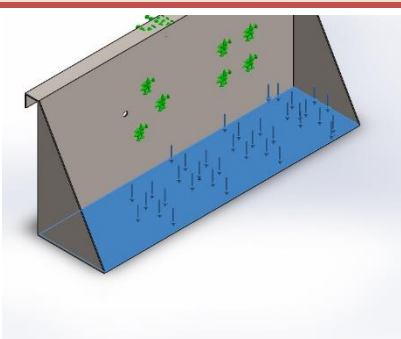
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: Alloy Steel Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 6.20422e+008 N/m² Tensile strength: 7.23826e+008 N/m²</p>	<p>SolidBody 1(Cut-Extrude1)(suporte baterias 3)</p>



Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-2		Entities: 9 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 135 N



Mesh Information

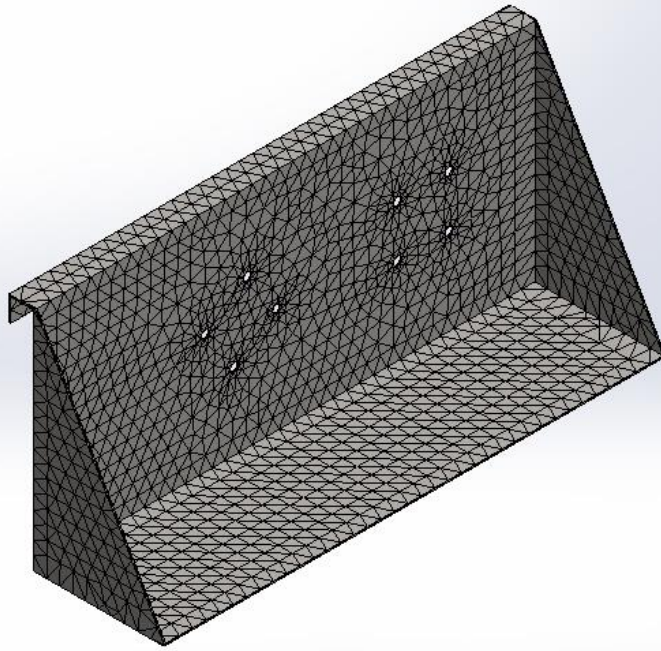
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	15.8406 mm
Tolerance	0.792029 mm
Mesh Quality	High

Mesh Information - Details

Total Nodes	17586
Total Elements	8533
Maximum Aspect Ratio	29.328
% of elements with Aspect Ratio < 3	0.0703
% of elements with Aspect Ratio > 10	3.84
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02
Computer name:	ROSHIBA_L50

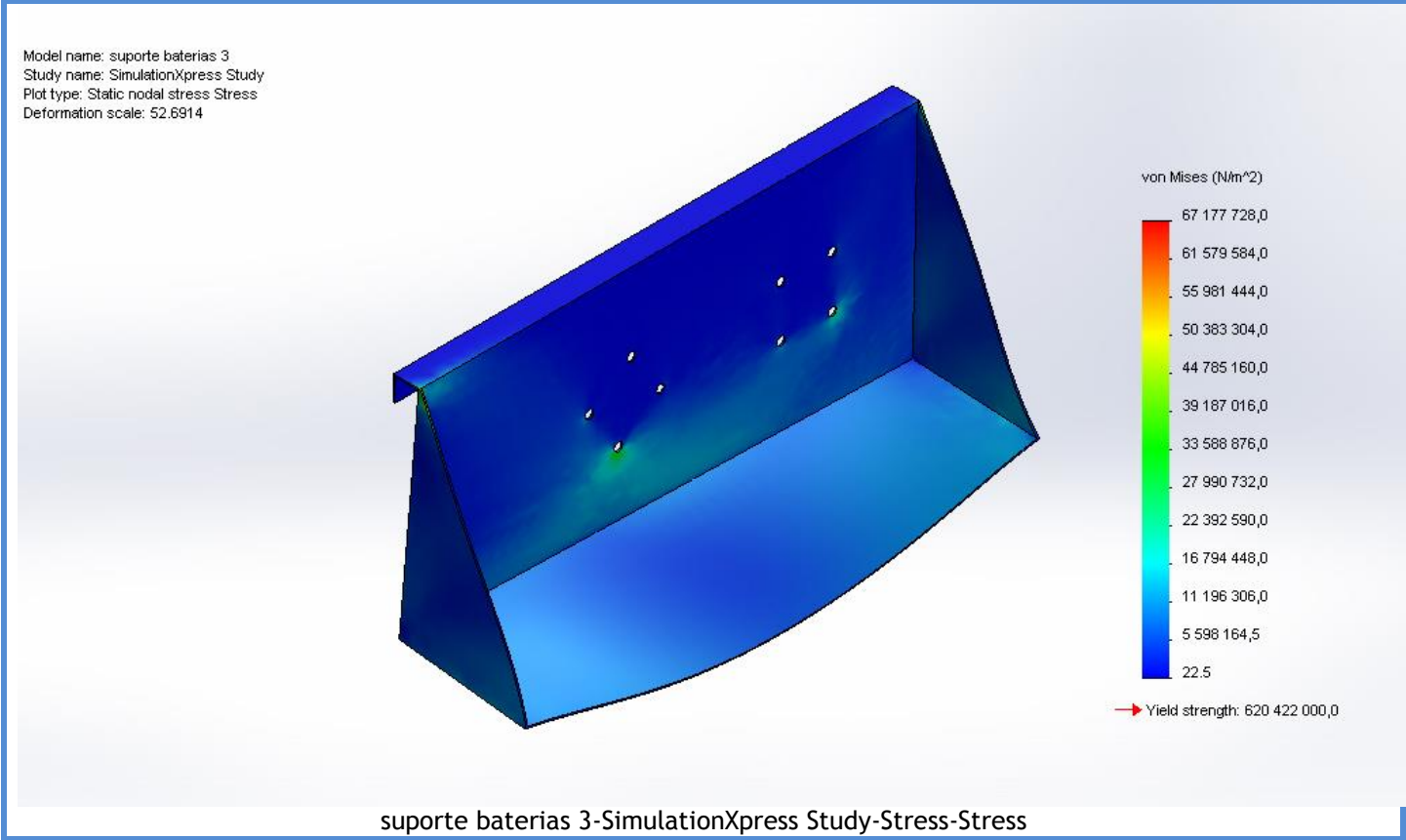


Model name: suporte baterias 3
Study name: SimulationXpress Study
Mesh type: Solid mesh



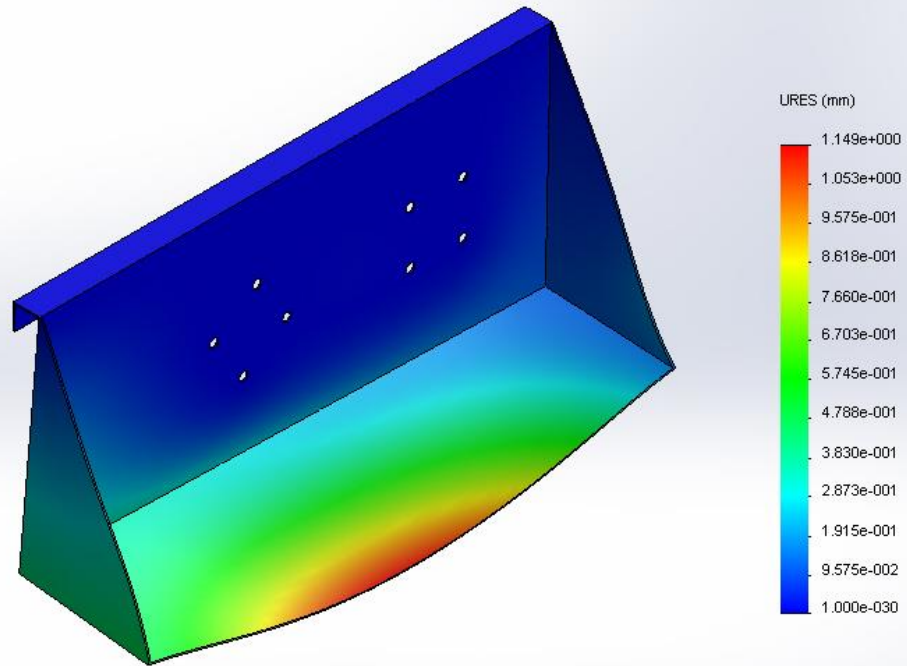
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	22.4902 N/m^2 Node: 5054	6.71777e+007 N/m^2 Node: 16463



Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm Node: 1	1.14901 mm Node: 2038

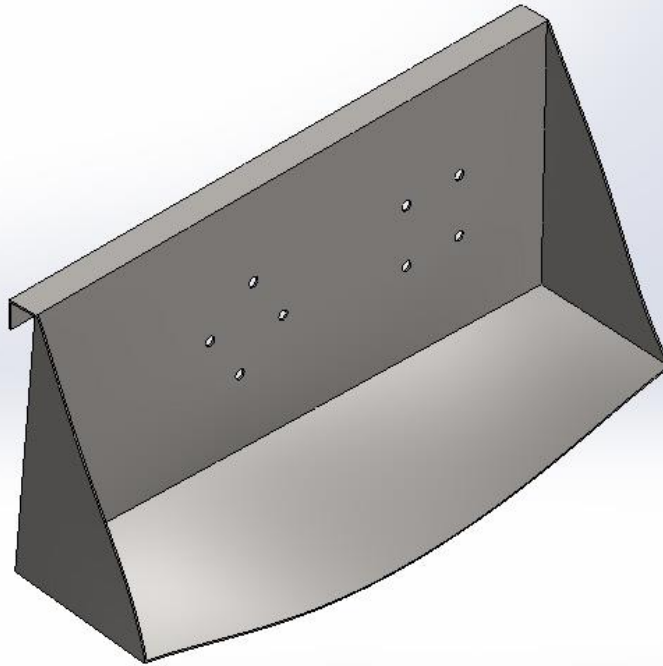
Model name: suporte baterias 3
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Static displacement Displacement
 Deformation scale: 52.6914



suporte baterias 3-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed Shape

Model name: soporte baterias 3
 Study name: SimulationXpress Study
 Plot type: Deformed Shape Deformation
 Deformation scale: 52.6914

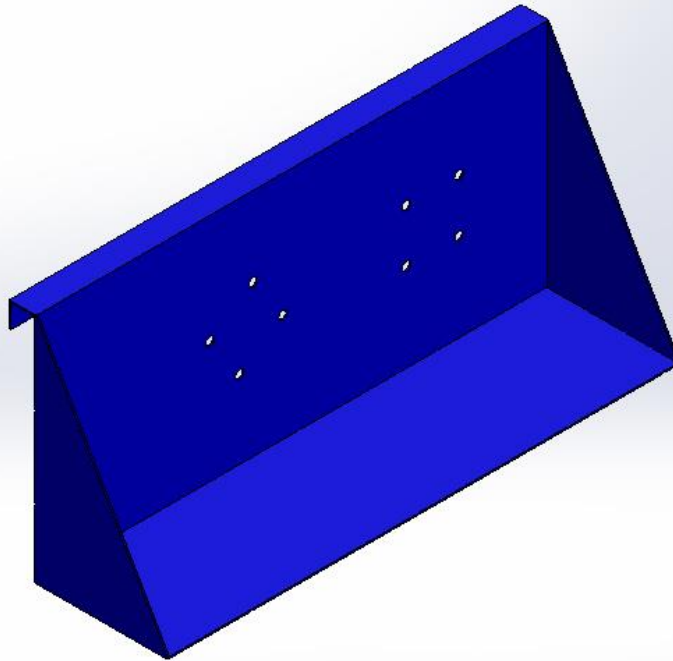


soporte baterias 3-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	9.23553 Node: 16463	2.75863e+007 Node: 5054



Model name: suporte baterias 3
Study name: SimulationXpress Study
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
Criterion : Max von Mises Stress
Red < FOS = 1 < Blue



suporte baterias 3-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion